ÉLECTRICITÉ

ET

MAGNÉTISME,

PAR

Fleeming JENKIN,

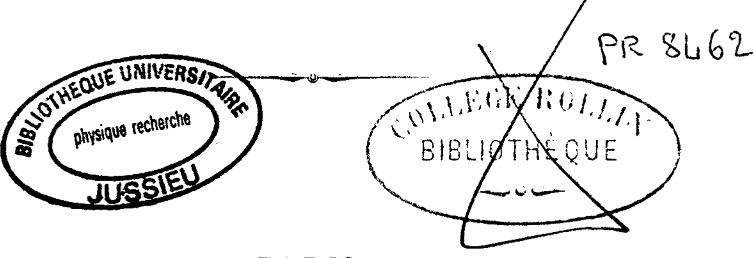
PROFESSEUR DE MÉCANIQUE A L'UNIVERSITÉ D'ÉDIMBOURG

TRADUIT DE L'ANGLAIS SUR LA SEPTIÈME ÉDITION,

PAR

M. H. BERGER,
Directeur-ingénieur des lignes
télégraphiques, ancien élève de l'École
Polytechnique.

M. CROULLEBOIS,
Professeur à la Faculté des Sciences
de Besançon, ancien élève
de l'École normale supérieure.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES
SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,
Quai des Augustins, 55.

1885

AVIS DES TRADUCTEURS.

En Angleterre, le livre de M. F. Jenkin sur l'Électricité et le Magnétisme est classique : on l'étudie dans les Universités, et les ingénieurs électriciens ne manquent pas de le placer au nombre des quelques traités spéciaux qu'ils mettent à la disposition de leur personnel dans chaque atelier. On ne s'étonnera pas, en présence de ce succès, que sept éditions aient été épuisées en quelques années.

Frappés du mérite théorique et pratique de ce livre, et convaincus qu'une traduction française serait favorablement accueillie de toutes les personnes qui, par goût ou en raison de leur profession, s'intéressent à cette branche de la Physique, nous avons entrepris le travail que nous offrons au public. L'Œuvre de M. F. Jenkin a été fidèlement respectée; mais il nous a paru utile d'ajouter à la fin de l'Ouvrage plusieurs notes qui en faciliteront la lecture. Au moment où cette traduction était presque terminée, une maladie subite et grave a mis M. Croullebois dans la nécessité de cesser tout travail; un de ses anciens élèves, M. Banet-Rivet, actuellement professeur de Physique au Lycée de Marseille, a bien voulu mettre en ordre et compléter les notes de M. Croullebois.

Toujours prêt à contribuer au développement d'une Science à laquelle il a lui-même consacré plusieurs années de sa vie à sa

sortie de l'École Polytechnique, M. Gauthier-Villars a consenti à imprimer notre traduction : nous lui adressons nos remerciements sincères et affectueux pour les soins apportés à cette impression.

M. le Ministre des Postes et des Télégraphes a bien voulu nous encourager dans ce travail : qu'il nous permette de le placer avec confiance sous son patronage éclairé et de lui témoigner ici nos respectueux remerciements.

PRÉFACE.

Quand l'auteur fut prié d'écrire ce petit livre, il se prêta d'autant plus volontiers à ce désir qu'il avait lui-même reconnu depuis longtemps l'utilité d'un traité élémentaire d'Électricité et de Magnétisme conçu sur un plan nouveau. On peut presque dire qu'il y a aujourd'hui en Angleterre deux Sciences de l'Électricité, l'une qui s'étudie dans les livres classiques, et l'autre, sorte de science flottante connue plus ou moins parfaitement des électriciens pratiques, qui se trouve éparse dans de nombreux mémoires de Faraday, Thomson, Maxwell, Joule, Siemens, Mathiessen, Clark, Varley, Culley et autres. La Science des écoles est si différente de celle des ingénieurs qu'il n'est pas possible de mettre entre les mains des jeunes électriciens un livre satisfaisant ou à peu près satisfaisant : il faut les renvoyer aux rapports de l'*Association Britannique pour l'avancement des Sciences*, au *Journal des Mathématiques de Cambridge*, etc. Un étudiant pourrait connaître à fond le remarquable et précieux traité de Delarive et cependant se trouver pour ains dire en pays inconnu dans la société des hommes pratiques dont la langue lui sera absolument étrangère. Chose non moins digne

d'attention, la Science de ces derniers est en quelque sorte beaucoup plus savante que la Science enseignée dans les livres classiques. Ceux-ci ne contiennent guère qu'une série de faits visiblement incohérents, et c'est seulement par un travail d'esprit considérable qu'en parcourant cette longue liste d'expériences décousues on peut à peu près comprendre chacune d'elles dans tous ses détails; l'intelligence complète des phénomènes les plus simples décrits dès a première page des livres classiques nécessite la connaissance des faits exposés en dernier lieu.

L'auteur a pensé que, pour cette raison même, il ne devait pas écrire son livre suivant le plan ordinaire, c'est-à-dire rapporter d'abord une série d'expériences et fonder une Science sur la description de phénomènes plus ou moins complexes. Il n'y a pas un seul fait électrique qui puisse être compris ou même expliqué correctement, si un aperçu général de la Science n'a pas été préalablement exposé, et si les termes employés n'ont pas été définis. Les expressions dont on se sert n'impliquent aucune hypothèse, et pourtant l'explication même de ces termes constitue ce qu'on peut appeler une théorie. On ne peut pas se borner dans l'explication des termes à de simples définitions, parce que ces termes se rapportent à des phénomènes inconnus du lecteur. La seule explication des expressions employées nécessite donc une rapide description de faits que le lecteur devra d'abord accepter pour vrais. Nombre d'affirmations ne sauraient être démontrées qu'à l'aide d'appareils compliqués, et, pour comprendre l'action de ces appareils compliqués, il faut s'être familiarisé avec la théorie générale.

Le plan suivi dans cet Ouvrage sera le suivant : on présentera d'abord un aperçu général et synthétique de la Science, dans lequel les principaux phénomènes seront décrits et les termes expliqués. Cette vue d'ensemble offrira peut-être au lecteur quelque difficulté, et cependant ceux qui l'aborderont sans idée préconçue sur la tension, l'intensité, etc., la trouveront probablement plus claire que ceux qui ont étudié les livres classiques. Si cette partie de l'Ouvrage est bien comprise, le lecteur sera vite en état de se rendre compte du

reste, c'est-à-dire de la description des appareils employés pour mesurer les grandeurs électriques et pour produire de l'électricité sous diverses conditions. La différence signalée entre l'électricité des écoles et la Science des cabinets d'expériences tient principalement à ce que la nécessité de mesures définies s'impose absolument dans la pratique. Dans les écoles il suffit de savoir que dans telle ou telle circonstance un courant se manifeste, une résistance est augmentée. L'électricien pratique est obligé de déterminer ce que valent ce courant et cette résistance, ou bien il ne sait rien; la différence est analogue à celle qui existe en chimie entre l'analyse quantitative et l'analyse qualitative. Cette mesure des grandeurs électriques nécessite absolument l'emploi du mot et de l'idée de potentiel; il faut également parler de diverses unités dont chacune a un nom spécial et qui servent à exprimer les grandeurs électriques. Du choix bien entendu de ces unités dépend la simplicité des formules qui représentent les lois des phénomènes électriques. On donnera ces lois ainsi que les méthodes de mesure, puis on fera connaître les principales applications de l'électricité à la télégraphie et on examinera la construction des appareils télégraphiques. Ceux-ci varient dans leur forme d'année en année, et les modèles spéciaux, maintenant en usage, seront vite remplacés par d'autres mais la théorie générale de l'Électricité, sur laquelle la construction et l'emploi de ces appareils reposent, demeure la même, parce qu'elle ne dépend d'aucune hypothèse; le but de l'auteur a été de présenter cette théorie générale sous une forme simple qui puisse être comprise aisément des hommes pratiques.

En relisant la Préface qu'il avait préparée pour la première édition de son livre, l'auteur ne voit pas qu'il ait rien à y changer; il sent que ce livre, écrit à diverses reprises dans les rares moments de loisir que lui laissaient ses devoirs professionnels, demeure bien au-dessous de l'idéal qu'il avait conçu; il ne comprend que trop bien que sa disposition serait susceptible d'améliorations importantes et que nombre de passages pourraient être expliqués plus clairement; mais il compte sur l'indulgence de ses lecteurs parce

qu'il a du moins fait quelques pas dans la bonne voie, s'il n'a pas réussi à la parcourir entièrement.

Il doit remercier, pour la gracieuse assistance qu'il en a reçue, ses amis, Sir W. Thomson, Maxwell, Culley et Varley, et aussi trois de ses élèves, MM. Bottomley, Ayrton, et King, qui ont bien voulu se charger de revoir les épreuves de son livre.

MM. Latimer-Clark et Culley lui ont permis d'user librement de leurs remarquables Ouvrages.

TABLE DES MATIERES.

CHAPITRE I

QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ.

Pages.

CHAPITRE II

POTENTIEL.

CHAPITRE III

COURANT.

CHAPITRE VII

MESURES MAGNÉTIQUES.

CHAPITRE VIII

MESURES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

Pages.

CHAPITRE IX

MESURES DE L'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE.

CHAPITRE X

UNITÉS ADOPTÉES DANS LA PRATIQUE.

CHAPITRE XI

THÉORIE CHIMIQUE DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE.

Pages

CHAPITRE XII

THERMO-ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE XIII

GALVANOMÈTRES.

CHAPITRE XIV

ÉLECTROMÈTRES.

Pages.

CHAPITRE XV

PILES ÉLECTRIQUES.

CHAPITRE XVI

MESURE DES RÉSISTANCES.

Pages.

CHAPITRE XVII

COMPARAISON DES CAPACITÉS, POTENTIELS ET QUANTITÉS.

CHAPITRE XVIII

MACHINES ÉLECTRIQUES A FROTTEMENT.

CHAPITRE XIX

MACHINES SERVANT A PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ, AU MOYEN DE L'INDUCTION ÉLECTROSTATIQUE.

CHAPITRE XX

APPAREILS MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES.

CHAPITRE XXI

APPAREILS ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

Pages.

CHAPITRE XXII

APPAREILS TÉLÉGRAPHIQUES.

CHAPITRE XXIII

VITESSE DES SIGNAUX.

CHAPITRE XXIV

LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES.

CHAPITRE XXV

DÉFAUTS SUR LES LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

LISTE DES TABLES.

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME.



CHAPITRE I.

QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ.

1. Si l'on vient à frotter ensemble un morceau de verre et un morceau de gutta-percha ou de toute autre substance résineuse, on reconnaît qu'après avoir été frottés ces deux corps s'attirent légèrement l'un et l'autre. Un morceau de résine ainsi frotté contre le verre repousse un autre morceau de résine traité de la même manière. Un effet analogue se manifeste entre deux morceaux de verre frottés contre la résine. On constate encore que la résine ou le verre frotté attire tous les corps légers du voisinage. Les propriétés acquises par le verre et la résine ne sont pas permanentes.

On a donné le nom d'*électricité* à l'agent qu'on suppose produire ces effets et mettre les corps dans l'état particulier qu'on vient d'indiquer; il a paru naturel de regarder cet agent comme une sorte de fluide très subtil, et les termes adoptés dans l'étude de l'électricité dérivent de cette idée. On a longuement discuté pour savoir s'il y a un seul fluide ou deux fluides; il est absolument inutile de supposer que les phénomènes sont dus à un seul fluide, à deux fluides ou à une combinaison quelconque de fluides; toutefois, nous nous servirons en général dans ce Traité des appellations suggérées aux savants par la pensée que les phénomènes électriques sont le résultat de la présence ou de l'absence d'un fluide unique.

Aussi longtemps que le morceau de résine ou de verre frotté conserve les propriétés dont nous venons de parler, on dit qu'il est *électrisé* ou *chargé d'électricité;* il emporte cette électricité avec lui s'il est transféré d'un point à un autre. Si l'on vient à passer sur ces corps électrisés un morceau de drap mouillé, une feuille de métal ou la main humide, ils cessent d'être électrisés. On dit alors que l'électricité a été entraînée au dehors de la résine ou du verre, et les corps qui lui permettent de s'échapper ainsi de la résine ou du verre sont appelés *conducteurs de l'électricité.* Les métaux, l'eau, le corps humain, le bois mouillé et beaucoup d'autres corps sont conducteurs.

L'air est nécessairement un corps non conducteur; car, s'il en était autrement, il eût entraîné l'électricité de la résine ou du verre, aussi bien que le drap humide.

De même, la résine et le verre sont des corps non conducteurs; si l'on se borne, en effet, à poser un morceau de résine ou de verre électrisé sur un corps conducteur, il ne perd pas toute son électricité, mais il reste électrisé pendant quelque temps aux points qui ne sont pas dans le voisinage immédiat de la surface de contact.

Les corps non conducteurs sont aussi désignés sous le nom de *corps isolants.* Le verre, la gutta-percha, le caoutchouc, l'air sont des corps isolants.

2. Si un petit morceau de métal, fixé au bout d'une tige isolante, est amené au contact du morceau de résine ou de verre électrisé, on constate qu'il est mis dans un état électrique semblable à celui de la résine ou du verre qui l'a touché.

Le corps isolé qui a touché la résine repousse la résine elle-même, ou tout autre corps isolé qui aurait touché la résine électrisée; on peut dire qu'il est électrisé de la même manière que la résine ou chargé d'électricité *résineuse;* il attire le verre électrisé ou tout autre corps isolé qu'on aurait électrisé avec le verre ou chargé d'électricité *vitrée.*

Il résulte de ces expériences qu'une portion de l'électricité de la résine ou du verre est transmise à tout conducteur qui vient à toucher l'un ou l'autre de ces corps. Les propriétés électriques

acquises par le conducteur isolé qu'on a mis en contact avec la résine électrisée ont été acquises aux dépens de la résine ; la résine perd ce que le métal gagne ; semblablement, le conducteur électrisé peut attribuer une partie de ses propriétés à un conducteur en perdant lui-même ce qu'il donne. On est donc fondé, autant qu'on peut se rendre compte de ces phénomènes, à dire que ce conducteur porte avec lui une certaine quantité d'électricité, ou bien est chargé de cette quantité.

Le conducteur isolé a acquis les propriétés spéciales en vertu desquelles la résine et le verre avaient reçu le nom de corps électrisés ou chargés d'électricité ; mais il offre quelques particularités qui le distinguent des corps isolants électrisés. Par exemple, si l'on vient à toucher le conducteur avec la main ou avec l'extrémité d'un fil métallique qu'on tient à la main, pourvu d'ailleurs qu'on ne soit pas isolé soi-même, il perdra toute son électricité en un temps très court et pour ainsi dire instantanément ; au contraire, le corps isolant ne peut perdre son électricité que peu à peu, et quand la totalité de sa surface a été touchée successivement.

On peut conclure encore de ce résultat que, si par une cause quelconque la distribution de l'électricité est modifiée dans un corps, ce qui peut arriver même sans qu'il y ait changement dans la charge totale, la nouvelle distribution de l'électricité s'effectuera presque instantanément dans le conducteur électrisé et beaucoup plus lentement dans le corps isolant électrisé.

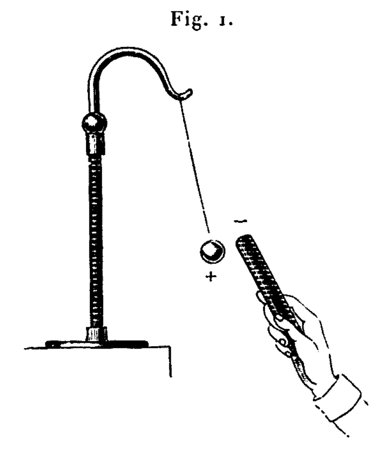
3. On constate que la force exercée, toutes choses égales d'ailleurs, par un corps électrisé sur un autre corps du voisinage aussi électrisé, dépend de la *quantité* d'électricité que ces corps possèdent. Si je réduis de moitié la quantité d'électricité contenue sur une sphère en la répartissant entre cette sphère et une autre sphère égale, la force exercée par l'électricité de chaque sphère sera en toute circonstance la moitié de la force constatée avant le partage de l'électricité. C'est cette force même qui nous sert à reconnaître l'état électrique de chaque sphère, et dès lors nous sommes fondés à dire que la quantité d'électricité contenue sur chaque sphère, après la nouvelle distribution, est la moitié de celle contenue primitivement sur la sphère touchée.

La résine et le verre ont été choisis pour nous servir de types dans ces expériences ; mais deux autres corps isolants frottés ensemble se comportent toujours de la même manière que le verre et la résine ; toutefois, suivant les corps qu'on expérimente, les effets sont plus ou moins marqués : ainsi, frottée contre un bâton de laque ou de résine, la flanelle se comporte comme un morceau de verre.

4. Les expériences que nous allons décrire éclairciront ce qui précède.

Suspendez une balle de moelle de sureau à un fil de soie (*fig.* 1);

Fig. 1.



on choisit de la moelle de sureau afin que la balle soit légère, et un fil de soie pour qu'elle soit isolée [1].

1° Un bâton de laque, frotté avec de la flanelle, attire la balle de sureau.

2° Lorsqu'elle a touché le bâton de laque, la balle de sureau conductrice est électrisée négativement, comme l'est le bâton de laque, puis repoussée par lui.

3° Disposez la flanelle, qui n'est pas un très bon isolant, de façon qu'elle soit isolée aussi bien pendant l'opération du frottement

(1) Dans toutes les figures, les parties marquées de lignes blanches transversales indiquent des corps isolants.

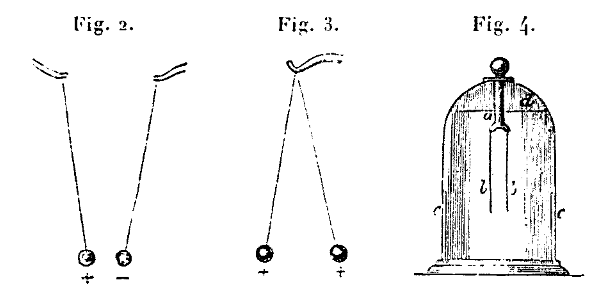
qu'après cette opération; on y réussit en lui donnant la forme d'une coupe et en la soutenant avec un fil de soie ou bien en la collant sur un disque de métal fixé à une tige d'ébonite. La flanelle frottée avec la laque se charge alors d'électricité vitrée, et attire la moelle de sureau chargée d'électricité résineuse.

Des effets inverses se produisent si l'on électrise la balle de moelle de sureau en la touchant avec la flanelle. Les fils de soie, la laque et la flanelle doivent tous être très secs; sinon la couche d'humidité qui les recouvre forme un conducteur par lequel l'électricité s'échappe avec rapidité. Quelquefois on dore la balle de sureau pour la rendre plus conductrice.

On peut faire avec la balle de sureau des expériences qui montrent le rapport existant entre la force observée et la charge électrique.

4° Deux balles de sureau, chargées d'électricités différentes, s'attirent l'une l'autre (*fig.* 2).

Fig. 2. Fig. 3. Fig. 4.



5° Deux balles de sureau, électrisées de la même manière et suspendues l'une à côté de l'autre, se repoussent (*fig.* 3). On peut observer le même effet au moyen de deux feuilles d'or isolées et suspendues l'une à côté de l'autre. Lorsque cet appareil est pourvu, comme dans la *fig.* 4, d'une cage en verre, d'un support et d'un système tel que la tige métallique a, qui sert à communiquer rapidement aux feuilles d'or une charge électrique provenant d'un corps quelconque dont on se propose d'examiner l'état, il porte le nom d'*électroscope* [1]. Cet instrument indique la présence de l'électri-

[1] Le nom d'*électromètre* est souvent appliqué à tort à l'appareil désigné ci-dessus sous le nom d'*électroscope*. Les électromètres seront décrits au n° 18.

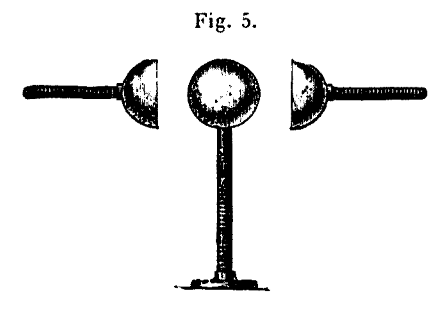
cité, en révélant l'existence d'une force; à parler rigoureusement, il ne mesure ni la force ni la quantité d'électricité; il ne fait qu'indiquer la présence d'une certaine force et d'une certaine quantité d'électricité. Le petit électroscope de la *fig.* 4 est pourvu d'un chapeau métallique *d* et de deux bandes métalliques non isolées *cc*, dont le rôle sera expliqué aux nos 14 et 23.

Quand on vérifie les lois relatives aux quantités électriques, il convient de se servir, pour produire de l'électricité, d'un appareil plus compliqué qu'un simple bâton de laque ou de verre. On peut employer la machine électrique ordinaire : elle consiste en un plateau ou cylindre de verre soumis à un mouvement de rotation et frotté pendant ce mouvement sur de la flanelle ou tout autre corps qui isole mal l'électricité ; il est pourvu de conducteurs convenablement disposés pour recueillir soit l'électricité vitrée produite à la surface du verre, soit l'électricité résineuse produite sur la flanelle. Nous ferons connaître la meilleure forme à donner à cette machine quand nous aurons expliqué d'une manière plus complète les lois de l'électricité. Les balles de moelle de sureau qui servent à vérifier les principes énoncés précédemment peuvent être suspendues à des tiges en verre ou en ébonite; il faut, en tout cas, que ces tiges soient très sèches et polies, sinon l'électricité ne demeure fixée sur les balles de sureau que pendant un temps très court.

5. On constate que la distribution de l'électricité sur les balles électrisées est indépendante de la masse de ces balles, pourvu que leur surface demeure constante. Des balles faites de matières différentes mais de même grosseur se comportent, si leurs surfaces sont conductrices, d'une manière absolument identique, en ce qui regarde la quantité d'électricité que chacune soutire d'un corps électrisé quelconque qui vient à les toucher; supposez que l'une soit de laiton massif, qu'une autre soit simplement une balle de moelle de sureau dorée, qu'une troisième soit une balle de fer creuse; on trouve que chacune possède, dans des circonstances semblables, ce qu'on peut appeler la même capacité pour l'électricité. Prenons encore deux calottes hémisphériques munies de manches isolants, et enveloppons avec elles une sphère métallique isolée du sol, mais reliée aux hémisphères; si, après avoir électrisé le système,

on enlève *à la fois* les deux calottes, on reconnaît que la sphère intérieure n'est pas électrisée. Vient-on à remettre les deux hémisphères en place et à reformer la sphère extérieure; on constate

Fig. 5.



que, si l'isolement a été parfait, cette sphère est électrisée aussi énergiquement qu'elle l'était d'abord. En se fondant sur cette expérience, on admet que l'électricité à l'état de repos réside sur la surface seule des corps. Ces principes peuvent être vérifiés au moyen des électroscopes déjà décrits.

Quoique l'électricité à l'état statique ne puisse être observée qu'à la surface des corps, on verra bientôt qu'à l'état de mouvement elle ne circule pas seulement à la surface : elle passe plus rapidement d'un conducteur à un autre le long d'une tige pleine que le long d'une tige creuse, ayant le même diamètre extérieur et faite de la même substance (*voir* Chapitre IV, n° 3).

6. Supposez qu'une balle conductrice isolée A ait été électrisée par contact avec un morceau de résine frottée, et qu'une autre balle exactement semblable B ait été électrisée par contact avec un morceau de verre frotté. Si les deux balles viennent maintenant à se toucher, elles prennent un état électrique qui est le même pour toutes deux. Si la balle A possédait primitivement plus d'électricité que B, tout le système est électrisé de la même manière qu'il le serait par la résine frottée; si B possédait primitivement plus d'électricité que A, tout le système est électrisé comme avec le verre frotté; en tous cas, la quantité d'électricité qui se trouve sur les deux balles, après le contact, est égale à la différence des

charges que les deux balles possédaient avant le contact. (On se rappelle que la quantité d'électricité est mesurée par la force qu'elle est capable d'exercer sur un conducteur donné.)

Le caractère qui distingue l'électricité due au verre frotté et celle due à la résine frottée est donc analogue à celui qui distingue en Algèbre les quantités positives et négatives; et cette remarque justifie l'emploi des termes *électricité positive* ou *négative*, au lieu des expressions *électricité vitrée* ou *résineuse*. Quand on ajoute deux quantités d'électricité, l'une positive et l'autre négative, le résultat est égal à la différence des valeurs arithmétiques de ces quantités. Si les deux balles possèdent des quantités d'électricité d'espèce différente et égales en valeur absolue, le contact a pour résultat de mettre fin à toute charge électrique : les deux corps cessent d'être électrisés; ils sont déchargés et se trouvent dans le même état que tous les corps non isolés qui les entourent.

7. L'électricité qui se manifeste sur le verre frotté est désignée sous le nom de *positive;* celle qui se manifeste sur la flanelle ou la gutta-percha frottée est appelée *négative*. On emploie souvent les signes algébriques + et — pour indiquer les deux états électriques différents.

Ainsi le signe + et les expressions *vitrée* et *positive* sont synonymes; il en est de même du signe — et des expressions *résineuse* et *négative*.

Les symboles + et — ont déjà été employés dans les figures qui précèdent pour montrer les attractions et les répulsions; on dit d'une manière abrégée que + repousse + et attire —, et que — repousse — et attire +.

8. Lorsqu'on produit de l'électricité, on constate qu'il se forme toujours des quantités égales d'électricité positive et négative. Le verre qui a été frotté s'électrise positivement pour son compte, ou, comme on le dit, devient positif; d'autre part, la substance qui sert de frottoir devient négative; la quantité répandue sur le verre est absolument égale et d'espèce contraire à celle répandue sur le frottoir. Lorsque celui-ci n'est pas isolé, l'électricité développée sur lui est immédiatement conduite à la terre et rend un

instant le sol plus négatif qu'il n'était d'abord; mais la masse de la terre, à laquelle appartient le verre frotté et positif, ne contient en définitive dans son ensemble ni plus ni moins d'électricité qu'elle n'en contenait d'abord; la distribution seule a été modifiée.

Lorsque les deux substances frottées ensemble sont mises en communication parfaite l'une avec l'autre, par l'intermédiaire de la terre ou de tout autre conducteur, les électricités positive et négative disparaissent; elles se sont neutralisées comme précédemment.

On ne connaît pas de substance qui isole assez complètement pour maintenir séparées les deux électricités au delà d'une certaine limite de temps. Il s'effectue une recomposition continue d'une substance à l'autre à travers la masse du corps isolant jusqu'à ce que la combinaison ou la neutralisation soit complète et que tous les signes d'électrisation disparaissent. Dans les expériences élémentaires d'électricité, une seule des deux espèces d'électricité apparaît, parce qu'elle est accumulée sur un conducteur de petites dimensions; l'autre est dispersée de toutes parts sur le sol environnant et, par suite, ne possède en aucun point la charge suffisante pour produire des effets appréciables. Frottez, par exemple, un morceau de cire à cacheter, sorte de résine, avec du drap; la cire à cacheter seule paraît électrisée, parce que l'électricité positive s'est répandue dans le sol en s'échappant du drap et en traversant la main et le corps de l'opérateur.

9. Lorsqu'un corps isolant est frotté contre un autre, l'un d'eux se charge d'électricité positive et l'autre d'électricité négative. En thèse générale, deux substances quelconques sont toujours électrisées, l'une positivement et l'autre négativement. Mais le verre qui, frotté avec de la flanelle ou de la soie, s'électrise positivement, se charge d'électricité négative quand il est frotté avec une peau de chat. Il résulte de ce fait que l'état électrique, positif ou négatif, d'une substance ne dépend pas absolument de sa matière même, mais est lié à quelque *relation* particulière entre les deux corps en contact. A l'aide d'expériences de ce genre, on a reconnu que tous les corps isolants peuvent être rangés dans un ordre tel que chacun de ces corps devienne toujours positif lorsqu'on le frotte avec un des corps qui suivent, et toujours négatif lorsqu'on le frotte avec

un des corps qui précèdent. La liste suivante est tirée du *Traité de Physique* de M. Ganot.

Peau de chat.	Flanelle.
Verre.	Coton.
Ivoire.	Laque.
Soie.	Caoutchouc.
Cristal de roche.	Résine.
La main.	Gutta-percha.
Bois.	Métaux.
Soufre.	Coton poudre.

Deux corps, qui sont très éloignés l'un de l'autre dans ce Tableau, sont nettement et franchement l'un positif et l'autre négatif quand on les frotte ensemble; mais il est possible qu'une erreur ait été commise dans le classement des substances voisines; une différence presque insignifiante dans la composition d'un corps, ou même dans l'état de sa surface, élève ou abaisse le rang de ce corps dans le Tableau; il suffit même d'en modifier la nuance; si sa température s'élève, il occupera un rang moins élevé, en sorte qu'un corps chaud, frotté avec un corps de même composition chimique, mais froid, s'électrise négativement. En général, on peut dire que, s'il existe la différence la plus légère entre deux corps isolants, cette circonstance suffit pour déterminer la production de l'électricité lorsqu'on vient à les frotter ensemble. On peut s'assurer aisément de la position relative de deux corps dans le Tableau ci-dessus, en frottant ensemble deux disques isolés faits avec ces corps et en observant leur action sur une balle de moelle de sureau préalablement chargée d'électricité d'espèce ou de signe connu.

10. Le mot *potentiel* sera désormais substitué dans ce livre à l'expression générale et vague d'*état électrique*. Quand un corps chargé d'électricité *positive* est mis en communication avec la terre, une certaine quantité d'électricité passe *du corps* chargé à la terre; de même, quand un corps chargé d'électricité *négative* est mis en communication avec la terre, une certaine quantité d'électricité passe *de la terre* au corps. En général, quand deux conducteurs dans des états électriques différents sont mis en contact, un flux d'électricité se produit de l'un à l'autre. L'élément

qui détermine le sens de ce mouvement est le *potentiel* relatif des deux conducteurs. L'électricité afflue toujours du corps dont le potentiel est le plus élevé vers celui dont le potentiel est le plus bas, quand ces deux corps sont en contact ou réunis par un conducteur. Lorsque aucun mouvement d'électricité ne se produit dans ces conditions, les deux corps sont, comme on dit, au même potentiel, quelle que soit d'ailleurs sa valeur absolue. Le potentiel de la terre est pris pour terme de comparaison, c'est-à-dire pour le zéro. Le *potentiel* d'un corps est la différence de son potentiel et de celui de la terre. Comme toutes les grandeurs, le potentiel est susceptible de mesure; nous ferons connaître d'une façon détaillée, dans le Chapitre II, la manière de le mesurer, ainsi que les conditions nécessaires pour produire un potentiel déterminé. En électricité, une différence de potentiel a pour analogue une différence de niveau en hydraulique. De la définition précédente du potentiel, il résulte que toutes les parties intérieures et extérieures d'un conducteur, dans lequel ou sur lequel l'électricité est à l'état de repos, sont nécessairement au même potentiel.

On dit qu'un corps n'est *pas isolé* quand il est réuni à la terre par un conducteur. Le potentiel d'un corps quelconque non isolé n'est ni négatif ni positif. Il n'y a rien dans notre manière de voir qui nous empêche de regarder la terre comme un corps électrisé; on sait qu'une partie quelconque de la terre est rarement ou plutôt n'est jamais dans le même état électrique qu'une autre portion du sol dans le voisinage. Or, nous prenons simplement pour point zéro l'état électrique de la terre au lieu même de l'observation et au moment de l'expérience, de la même manière que pour mesurer des hauteurs on prend pour origine des cotes un plan arbitraire, par exemple le plan horizontal fourni par la ligne des hautes marées à la Trinité; tout point au-dessus de ce plan a une cote positive; tout point au-dessous du même plan est écrit avec une cote négative.

11. On dit souvent que l'électricité positive attire la négative et repousse la positive, et aussi que l'électricité négative attire la positive et repousse la négative. Nous avons constaté que les corps électrisés présentent des attractions et des répulsions, suivant que leurs électricités sont de signe contraire ou de même signe,

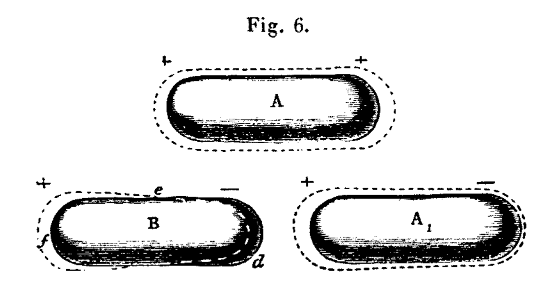
et par extension, nous pouvons dire de l'électricité elle-même qu'elle *attire* ou *repousse*.

Mais il y a un autre phénomène, désigné sous le nom d'*induction statique*, qui semble mettre plus nettement en évidence l'attraction ou la répulsion mutuelle des électricités elles-mêmes, indépendamment de l'attraction et de la répulsion des corps chargés d'électricité. Un corps A, amené dans le voisinage d'un corps B, dont le potentiel est différent, produit immédiatement sur la surface de B une distribution d'électricité semblable à celle qui s'accomplirait, conformément au système d'attractions et de répulsions énoncé au n° 7. Si A est chargé positivement, il attire de l'électricité négative sur l'extrémité du corps B la plus voisine, et il repousse de l'électricité positive sur les parties de B les plus éloignées. Si le corps B est isolé, il ne perd ni ne gagne rien en quantité; mais ses extrémités sont aptes à produire des phénomènes électriques de nature contraire. Vient-on à séparer ces deux extrémités, chacune conserve sa charge d'électricité positive ou négative. Si on relie à la terre et pendant un instant seulement l'extrémité de B la plus éloignée de A, de l'électricité positive est refoulée dans la terre et une charge négative permanente est fixée sur B.

Les choses étant dans le premier état, si l'on éloigne A, les électricités positive et négative de B se recombinent et se neutralisent l'une l'autre. Ainsi, par l'induction comme par le frottement, des quantités absolument égales d'électricités positive et négative sont produites en même temps. Il est commode de représenter la distribution de l'électricité sur la surface d'un corps par une ligne ponctuée dont la distance à la surface soit proportionnelle sur chaque point à la quantité d'électricité qui se trouve en cet endroit par centimètre carré de surface; si l'électricité est positive, la ligne ponctuée est tracée à l'extérieur du corps; si elle est négative, la ligne ponctuée est figurée en dedans du corps. Sur la courbe de séparation de la partie chargée positivement et de la partie chargée négativement, il n'y a absolument aucune charge. La *fig.* 6 représente une charge primitive et une charge induite figurées suivant les conventions qui précèdent. La ligne ponctuée autour de A montre la charge primitive quand A est à une grande distance de B. Lorsque A est amené en A_1 près de B, la distribution primitive de A est modi-

fiée, et en même temps de l'électricité se trouve induite à chacune

Fig. 6.



des extrémités de B, positive en f et négative en d; au point e il n'y a pas de charge.

12. Cet effet d'induction se produit dans l'espace autour de chaque corps électrisé. Si l'on suppose dans une salle une sphère électrisée positivement, la surface des murs, les meubles, l'observateur lui-même seront tous chargés négativement en vertu de l'induction. D'où vient donc cette électricité négative? Le corps électrisé inducteur, le verre par exemple, a été chargé positivement par le frottement, et si la charge contraire du frottoir a pu se répandre librement dans le sol, on peut dire que cette électricité négative a été attirée sur la surface des murs, des meubles, etc., en se distribuant suivant des règles définies qui doivent être l'objet d'études spéciales. Lorsque les deux corps, verre et frottoir, sont séparés et maintenus isolés, chacun d'eux induit sur toutes les surfaces du voisinage des quantités d'électricité positive ou négative, qui sont égales deux à deux; mais ces quantités d'électricité induite ne sont pas nécessairement égales à la quantité totale d'électricité qui se trouve sur l'un ou sur l'autre des corps frottés, à moins que ceux-ci ne soient très éloignés l'un de l'autre. Si les deux corps, chargés d'électricités égales et opposées, sont maintenus très près l'un de l'autre, leurs actions inductives réciproques s'épuisent presque entièrement sur leurs surfaces voisines; quant à leur action sur les murs de la salle, elle est à peu près nulle; car si l'un tend à induire en un point une charge positive, l'autre tend à y induire une charge négative; mais, à mesure que les corps électrisés tou-

jours isolés d'ailleurs sont éloignés l'un de l'autre, chacun produit son effet particulier d'une manière plus complète et indépendamment de l'autre. On verra qu'il est impossible de bien comprendre les phénomènes électriques sans reconnaître la présence constante de cette charge d'électricité induite, laquelle est de nature contraire à la charge primitive. L'existence même de la charge primitive implique l'existence d'une charge induite.

13. L'induction se produit toujours entre deux conducteurs dont les potentiels diffèrent, et qui sont séparés par un corps isolant. Lorsque les conducteurs sont à un même potentiel, il n'y a pas d'induction, quelle que soit la valeur de ce potentiel.

Si les murs d'une salle et un corps isolé dans l'intérieur de cette salle sont au même potentiel, on constate que le corps isolé ne produit aucun effet électrique. On peut isoler de la terre les murs de la salle ainsi que le corps intérieur et les porter ensemble à un potentiel commun très élevé; aucun des effets électriques, précédemment décrits, ne pourra être produit en dedans de cette salle par un expérimentateur. Le corps isolé n'attirera pas les corps légers; il ne déterminera ni charge induite ni distribution nouvelle d'électricité sur un conducteur du voisinage; lui-même ne sera pas chargé d'électricité, c'est-à-dire électrisé. Ainsi, pour la production de tous ces phénomènes, il faut non seulement que le corps isolé dans la salle soit à un potentiel élevé, mais encore que les murs qui l'entourent se trouvent à un potentiel différent. Dans les conditions précédentes, si le corps isolé et supposé à un potentiel élevé est mis en communication avec la terre, un flux d'électricité se précipite de ce corps vers la terre; puis une charge négative apparaît sur la surface du corps et une charge positive sur les parois intérieures de la salle. Le corps devient maintenant électrisé.

14. A la suite de ces explications, on comprendra aisément que l'attraction exercée par un corps électrisé A sur les corps non électrisés du voisinage est simplement due à l'électricité induite qu'il détermine dans ces corps. Le corps léger B non isolé (*fig.* 7) est attiré vers le corps A, électrisé négativement en raison de la charge positive qui se trouve sur B. Cette charge po-

sitive est d'ailleurs repoussée par les murs de la salle qui sont électrisés positivement sous l'action inductive du corps A. Le corps léger B isolé (*fig.* 8) est attiré parce que sa charge à

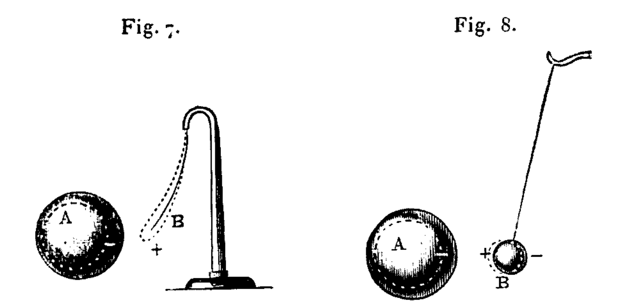


Fig. 7. Fig. 8.

la partie voisine de A est elle-même attirée. La charge qui se trouve sur B du côté opposé à A est repoussée au contraire par le corps A; mais comme elle est plus éloignée de A que la précédente, la force répulsive est moindre que la force d'attraction. La charge qui se trouve sur le corps B en face de A est repoussée vers A par les murs de la salle; la charge qui se trouve sur B du côté opposé à A est attirée vers les murs et tend à s'éloigner de A; comme cette charge est plus rapprochée des murs, l'action attractive de ceux-ci l'emporte sur leur action répulsive. C'est seulement en tenant compte de tous ces effets qu'on peut calculer exactement les forces mises en jeu; d'ailleurs, à moins que B ne soit très petit, il faut prendre en considération le changement très sensible qu'il détermine dans la distribution de l'électricité sur A.

Dans l'électroscope de la *fig.* 4 (nº 4), toute charge des feuilles d'or *bb* électrise par induction les bandes métalliques *cc*; celles-ci attirent les feuilles d'or et augmentent leur divergence. Les indications de l'instrument deviennent d'ailleurs plus régulières que s'il y avait du verre en face des feuilles *bb*; car on aurait toujours à craindre que le verre ne possédât une charge électrique propre et indépendante de la charge qui se trouve sur *bb*.

Une série d'actions semblables et aussi compliquées se produisent quand une sphère électrisée positivement est amenée dans le

voisinage d'une autre sphère électrisée positivement ; chacune repousse l'autre et est attirée par l'électricité négative induite sur les murs de la salle. Si ceux-ci sont également positifs, ils repoussent les sphères et les rapprochent ; si les sphères et les murs sont tous au même potentiel, les deux sphères positives sont en équilibre et non électrisées.

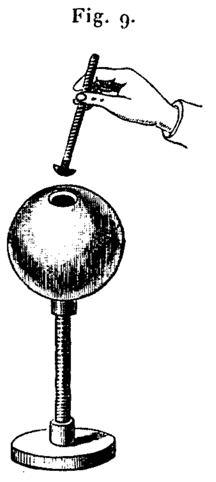
Le phénomène de l'induction nous permet de vérifier l'état électrique d'un corps quelconque sans lui enlever aucune portion d'électricité. Lorsqu'on présente un corps électrisé positivement au-dessus du bouton de l'électroscope (*fig.* 4), le bouton reçoit par induction une charge négative, et les feuilles d'or une charge positive : celles-ci s'écarteront donc l'une de l'autre. Si on éloigne le corps inducteur, les électricités se recombinent et la divergence des feuilles d'or cesse ; mais si le corps inducteur est de nouveau approché du bouton, et si l'on touche avec un conducteur non isolé, avec la main par exemple, le dessous du bouton ou la plaque disposée à cet effet sur l'appareil, on permet à l'une des deux électricités de s'écouler dans la terre, et alors l'électroscope est chargé d'une façon permanente avec une électricité d'espèce contraire à celle contenue sur le corps inducteur.

15. La distribution de l'électricité peut être étudiée de deux manières.

La première consiste à toucher la surface du corps, que nous supposons être électrisé, avec un petit disque isolé appelé *plan d'épreuve,* puis à retirer ce conducteur et à observer s'il est apte à produire soit une attraction ou une répulsion, soit une induction électrique. Si ce conducteur est de petite dimension et fixé à l'extrémité d'une longue tige isolante et de faible section, il ne modifiera pas sensiblement la distribution de l'électricité sur la surface soumise à l'expérience, quoique cette distribution doive être toujours un peu altérée par l'induction entre le disque et le corps électrisé. Au moment où il touche le corps, il devient sensiblement partie intégrante de la surface de ce corps et prend la même charge que le corps au point touché, ou à peu près la même charge. Lorsqu'il est retiré, il retient donc une charge sensiblement proportionnelle à ce qu'on appelle la densité de l'électricité au point de contact, et l'on peut

se rendre compte de celle-ci en observant la force attractive ou répulsive que le plan d'épreuve est capable d'exercer directement ou par induction sur un corps supposé à un potentiel constant, par exemple sur la balle de moelle de sureau de l'électroscope. A l'aide d'expériences de cette nature, on a pu étudier la distribution de l'électricité, et l'on a constaté qu'aucune trace d'électricité n'existait à l'intérieur d'un conducteur creux et vide. Un plan d'épreuve introduit (*fig.* 9) dans l'intérieur d'une sphère fortement électrisée n'accuse la présence d'aucune charge sensible d'électricité, à moins que par accident il ne touche le bord de l'ouverture au moment où on le retire. Cette distribution est une conséquence nécessaire de la loi en vertu de laquelle chaque portion élémentaire d'une charge électrique repousse toute autre portion semblable avec une force inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Nous étudierons plus tard quelques-unes des lois qui règlent la distribution de l'électricité sur la surface d'un conducteur de forme régulière, en supposant qu'il soit assez éloigné de tous les conducteurs voisins pour que cette distribution ne dépende que de la forme de la surface électrisée. Ces lois montreront que l'électricité tend à s'accumuler sur toutes les parties en saillie et que la densité en ces points est nécessairement très considérable. Ensuite il nous faudra étudier la distribution de l'électricité sur deux surfaces conductrices placées en face l'une de l'autre. La distribution dans ce cas dépend non seulement de la forme des surfaces, mais encore de leur proximité. Par exemple, si l'intérieur d'un conducteur creux est chargé par l'induction d'un corps quelconque, électrisé et isolé, qui y est introduit, la charge sur la surface interne sera plus grande aux points où les deux surfaces seront plus rapprochées. La charge dépend aussi de la nature du corps isolant qui sépare les deux surfaces.

Fig. 9.



Une seconde manière d'étudier la distribution de l'électricité consiste à séparer la portion du corps soumise à l'expérience du

système dont elle fait partie, en l'isolant de ce système; son électricité peut alors être constatée par le plan d'épreuve ou par ses effets directs.

16. Il résulte des explications déjà fournies (nº 11) qu'un conducteur électrisé peut, sur certains points de sa surface, n'avoir qu'une faible charge ou même n'en avoir aucune. Si l'on vient à toucher ces points avec le plan d'épreuve, on n'en retire aucune trace d'électricité. Concevons, par exemple, un cylindre électrisé par induction, de façon qu'une de ses extrémités soit positive et l'autre négative, comme le corps B de la *fig.* 6; les points voisins de la ligne médiane en *e* ne seront pas chargés; ils n'électriseront ni le plan d'épreuve ni tout autre conducteur de petite dimension; et même si l'on enlève en cet endroit une portion du cylindre, elle ne donnera aucun signe d'électricité. Cependant, si l'on approche de ces points jusqu'au contact un conducteur de dimension considérable, l'ensemble de la distribution électrique sera modifié par induction avant que le contact ait lieu. Par exemple, si l'on réunit le point *e* de la *fig.* 6 à la terre, la distribution de l'électricité est altérée sur toute l'étendue de B; car, bien que *e* ne soit pas plus chargé d'électricité que la terre elle-même, le potentiel du corps B a été augmenté par suite de l'induction de A sur B; donc, en approchant le fil de communication, on change la distribution de la charge; l'électricité positive s'accumule en face du fil, même avant que le contact soit établi, et la réunion de *e* à la terre a pour résultat de laisser le corps B chargé d'électricité négative seulement et de le mettre au potentiel de la terre.

Quelquefois la distribution de l'électricité est telle que le conducteur électrisé peut être mis en contact avec un conducteur de très grande dimension, avec la terre, par exemple, sans qu'il perde son électricité ou sans que la distribution soit modifiée en aucune manière, le conducteur électrisé étant primitivement au potentiel de la terre. Considérons, par exemple, le conducteur A (*fig.* 10) électrisé positivement; il est isolé et séparé du corps B par un corps isolant ou diélectrique de faible épaisseur C. Si l'on suppose qu'il y a sur le conducteur B une charge négative égale à la charge positive de A, aucune charge sensible ne sera constatée

sur les surfaces extérieures de A ou de B, pourvu que ces surfaces soient tenues à distance de tout autre conducteur. On peut obtenir cette distribution en électrisant A pendant que B est en contact avec la terre. La charge positive de A induit alors une charge négative sur B, comme le montrent les lignes ponctuées. La charge de A se trouve sur la face opposée à B; la charge de B se trouve sur la face opposée à A. On peut dans ce cas mettre *séparément* A ou B en communication avec la terre, sans troubler sensiblement la charge de A ou de B. Si on les met *tous deux* en communication avec le sol ou avec un autre conducteur, les électricités se combinent et se neutralisent l'une l'autre. Le diélectrique n'est pas nécessairement un corps solide comme dans la *fig.* 10; il peut être formé d'une couche d'air comme dans la *fig.* 11. La distribution d'électricité qu'on vient d'indiquer est celle qu'offre une *bouteille de Leyde* chargée (*fig.* 12). L'armature extérieure A possède une

Fig. 10. Fig. 12.

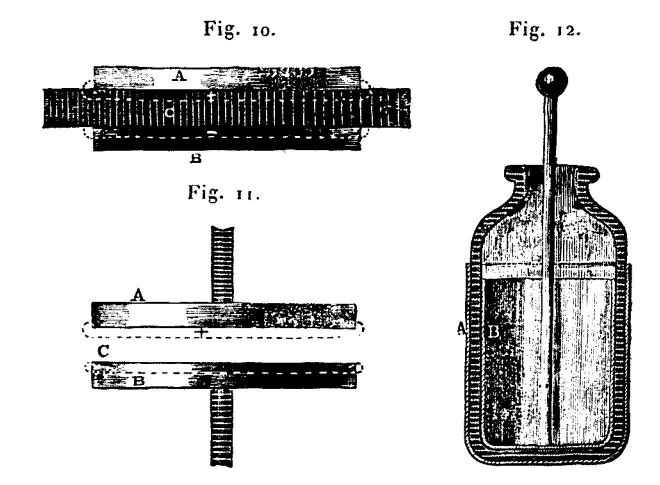


Fig. 11.

charge d'électricité considérable et à peu près égale à la charge de l'armature intérieure B; néanmoins aucune trace d'électricité ne passe de l'armature extérieure à la terre. Le potentiel de l'armature extérieure est zéro. On dit souvent que dans ce cas l'électricité est latente ou dissimulée; en réalité elle n'est pas plus latente ni dissimulée que toute autre charge d'électricité. La distribution

est telle qu'aucune charge sensible n'existe à la face externe de l'armature extérieure, la quantité totale que possède cette armature se trouvant sur sa face interne.

Si l'on construisait une bouteille de Leyde pourvue d'une ouverture qui permît l'introduction d'un plan d'épreuve entre les armatures extérieure et intérieure, on pourrait retirer de l'une ou l'autre une quantité proportionnelle à la charge en chaque point. C'est en réalité ce que l'on fait quand, à l'aide du plan d'épreuve, on enlève une portion de la charge soit d'un conducteur placé à l'intérieur d'une salle, soit des murs d'une salle contenant un corps électrisé. Il n'y a, au point de vue théorique, aucune différence entre les armatures intérieure et extérieure de la bouteille de Leyde; la face externe de l'armature intérieure et la face interne de l'armature extérieure sont toutes deux chargées. De ces deux faces on peut retirer une charge électrique avec le plan d'épreuve; les deux autres faces des armatures ne fournissent aucune charge.

Lorsqu'un conducteur est chargé, il se forme nécessairement une sorte de bouteille de Leyde. Le conducteur est l'armature intérieure, l'air est le diélectrique, et les conducteurs du voisinage les plus rapprochés, tels que les murs de la salle ou la personne de l'opérateur, forment l'armature extérieure; mais le nom de *bouteille de Leyde* est réservé au système où les deux conducteurs opposés sont placés très près l'un de l'autre. Le système ainsi obtenu s'appelle aussi un *condensateur* ou *accumulateur*. La différence de potentiel entre les deux armatures de la bouteille de Leyde demeure constante, quelle que soit celle des deux armatures qu'on mette en communication avec le sol. Supposons qu'on donne à l'armature intérieure une charge positive; l'armature extérieure aura un potentiel négatif si on l'isole et si l'on met ensuite à la terre l'armature intérieure.

17. On peut mesurer la quantité d'électricité qui se trouve sur un conducteur donné. Suivant que cette quantité est plus ou moins grande, la force qu'elle exerce sur d'autres quantités d'électricité est elle-même plus ou moins grande. Pour mesurer des quantités d'électricité, il faut donc mesurer les forces relatives que des quantités différentes exercent dans les mêmes circonstances; si

une quantité d'électricité A développe une force double de celle que développe la quantité B dans des circonstances absolument semblables, on est fondé à dire que la quantité A est double de la quantité B. Quelle que soit la grandeur à mesurer, une unité est nécessaire, et il nous faut convenir de celle que nous adopterons pour les quantités électriques.

Il est commode de choisir pour *unité de quantité d'électricité* la quantité qui, concentrée en un point, agit avec l'unité de force sur une quantité égale et de même signe, concentrée en un point distant du premier de l'unité de longueur. On pourrait adopter pour les unités de longueur et de force une longueur et une force quelconques. Les unités de longueur et de force choisies par l'auteur de ce livre sont le centimètre et la force capable d'imprimer au bout d'une seconde une vitesse d'un centimètre à une masse pesant un gramme. L'unité de quantité d'électricité est, dans ce système connu sous le nom de *système électrostatique,* la quantité qui, concentrée en un point, repousserait une quantité égale et concentrée en un autre point distant de $0^m,01$, avec une force capable de produire sur 1^{gr}, après avoir agi pendant une seconde, une vitesse de $0^m,01$. Rien n'empêcherait d'adopter pour unité de quantité celle qui repousserait une quantité égale et concentrée en un point distant de $0^m,30$ (pied anglais) avec une force capable d'imprimer au bout d'une seconde une vitesse de $0^m,30$ par seconde à une masse pesant $0^{gr},06$ (poids du grain anglais). L'idée de laquelle toutes ces définitions dérivent est identique; mais celle que nous avons adoptée est préférable à toutes les autres, parce qu'elle réduit les calculs à la plus grande simplicité possible.

18. En pratique on peut, dans beaucoup de cas, mesurer les quantités d'électricité en mesurant directement les forces électriques en jeu; l'appareil au moyen duquel ces forces sont évaluées s'appelle un *électromètre absolu.* En général, un appareil à l'aide duquel les forces produites dans les mêmes circonstances par des quantités différentes sont comparées numériquement, sans être immédiatement mesurées en unités de force, se nomme un *électromètre.* Les méthodes qui servent à mesurer les quantités d'élec-

tricité par voie indirecte sont souvent plus commodes pour les besoins pratiques; mais les mesures doivent toujours être faites en unités de l'espèce indiquée, ce qui se peut d'ailleurs.

Quand on étudie la distribution de l'électricité sous diverses conditions, on ne doit pas se borner à reconnaître d'une façon sommaire que, sur certains points, il y a plus d'électricité et que sur d'autres il y en a moins; on ne doit même pas se contenter de reconnaître les valeurs relatives des charges aux divers points d'un conducteur donné; mais il faut se proposer de déterminer exactement la quantité d'électricité contenue sur l'unité de surface, c'est-à-dire la *densité* de la charge électrique. Les électromètres dont on se sert pour comparer les quantités d'électricité doivent nous donner les valeurs relatives des charges électriques aux différents points d'une même surface ou de plusieurs surfaces; un électromètre absolu fait plus : il fournit non seulement les valeurs relatives, mais encore les valeurs absolues des charges.

19. Jusqu'ici on a considéré l'électricité comme engendrée soit directement par le frottement, soit indirectement par l'induction statique; il y a plusieurs autres moyens d'obtenir de l'électricité :

1° Le simple contact de deux métaux différents, isolés l'un et l'autre, a pour effet de les charger, l'un d'électricité positive et l'autre d'électricité négative, en quantités précisément égales; ou, pour parler plus correctement, ces métaux sont, après le contact, chargés d'une manière différente. Les charges ainsi obtenues sont très faibles.

2° Lorsqu'un métal est plongé dans un liquide, un effet semblable a lieu; une différence de potentiel est produite par le contact, et le liquide et le métal sont électrisés en sens contraires. Le degré de l'électrisation varie avec les différents métaux et les différents liquides, mais il est toujours très faible en comparaison de celui qu'on peut obtenir par le frottement.

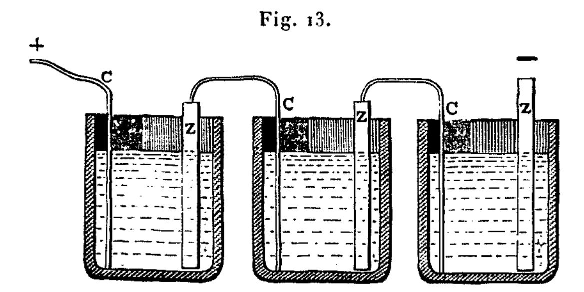
3° Quand deux métaux différents sont plongés l'un à côté de l'autre dans un liquide, tel que l'eau ou une dissolution étendue d'acide sulfurique, ils ne manifestent aucun signe d'électrisation. Les trois substances en présence demeurent au même potentiel.

sinon absolument, du moins à peu de chose près ([1]). Une exposition détaillée de ce fait curieux se trouve au Chapitre II (n° 22).

4° Si, les deux métaux différents étant plongés dans le liquide, on soude à chacun d'eux une lame de même substance et formée d'un de ces métaux, ces deux lames présenteront une différence de potentiel précisément égale à celle qui se produirait au contact direct des deux métaux hétérogènes. Ainsi, bien que la chaîne zinc, eau, cuivre, placée dans un vase isolé, soit tout entière au même potentiel, si je soude au zinc une lame de cuivre, celle-ci deviendra positive par rapport aux éléments zinc, eau, cuivre de la chaîne, qui tous trois restent au même potentiel.

Le nom d'*élément de pile* est donné à un vase de matière isolante, qui contient deux métaux différents plongés dans un liquide; il faut que celui-ci soit composé de deux ou de plusieurs éléments chimiques, dont l'un au moins tend à se combiner avec l'un des deux métaux ou bien avec tous les deux à des degrés différents. Dans un élément considéré isolément, aucune charge d'électricité n'est acquise ni par l'un ni par l'autre métal; mais, si l'on dispose à la suite l'un de l'autre plusieurs vases pleins de dissolution et si l'on y plonge par couples successifs des plaques métalliques C et Z, réunies comme l'indique la *fig.* 13, des charges d'électricité très con-

Fig. 13.



sidérables seront communiquées aux conducteurs mis en contact

([1]) La théorie de la pile connue sous le nom de *théorie de Volta*, est celle qui est adoptée dans ce Traité. En énonçant le principe ci-dessus, nous nous trouvons en contradiction formelle avec un grand nombre de Traités sur l'Électricité, où l'on trouve que les métaux différents deviennent l'un positif et l'autre négatif (Chap. II, n° 24).

avec les plaques métalliques extrêmes. Lorsqu'on se sert de cuivre, de zinc et d'eau ou d'une dissolution étendue d'acide sulfurique, la dernière plaque de cuivre charge un conducteur positivement et la dernière plaque de zinc le charge négativement. Du sulfate de zinc se forme pendant l'expérience, et l'on constate que cette action chimique est essentielle pour la production d'une quantité d'électricité considérable; aussi dit-on souvent que l'électricité obtenue par ce procédé est due à l'action chimique pour la distinguer de celle qui est obtenue par le frottement. On peut considérer la charge électrique ainsi obtenue comme étant totalement due à l'action chimique; mais on peut aussi la regarder comme étant due aux jonctions successives des cuivres et des zincs. On constate en effet que la grandeur de la charge communiquée à un conducteur donné est simplement proportionnelle au nombre de ces jonctions et qu'elle dépend des métaux en contact et non des liquides. En d'autres termes, la différence de potentiel produite est proportionnelle au nombre des jonctions. Ces deux manières de voir sont désignées sous les noms de *théorie chimique de la pile* et de *théorie du contact;* on supposait qu'elles sont incompatibles quand en réalité elles sont vraies l'une et l'autre.

20. Il n'y a aucune différence entre l'électricité produite par le frottement et celle qui est obtenue par la réaction chimique. C'est un point digne d'attention que dans chaque cas l'électricité exige pour se développer le contact de deux substances différentes. Le contact a besoin d'être secondé par le frottement s'il s'agit de corps isolants, et par la réaction chimique s'il s'agit de corps conducteurs. Le frottement entre deux corps isolants différents produit toujours de l'électricité; la différence dans l'action chimique d'un composé liquide bon conducteur sur deux métaux différents produit de l'électricité. L'analogie qui existe entre le frottement et action chimique n'est pas connue. Dans l'un et l'autre cas, des quantités égales d'électricité positive et d'électricité négative sont développées simultanément; c'est ce qu'on exprime quelquefois en disant que tous les corps sont toujours électrisés, et que le contact et le frottement ou le contact et l'action chimique déterminent simplement une distribution nouvelle d'électricité.

21. L'électricité peut aussi être produite par la simple pression, c'est-à-dire, en réalité, par le contact de deux corps isolants différents : l'électricité est retenue par ces isolants après qu'ils sont séparés. Ce fait est absolument analogue à la production de l'électricité par le contact de deux corps conducteurs.

22. Certains minéraux, lorsqu'ils sont chauffés, acquièrent une charge électrique dont le signe n'est pas le même sur tous les points du minéral. Ainsi un morceau de tourmaline chauffé est électrisé positivement à l'une de ses extrémités et négativement à l'autre extrémité. Cette électricité est désignée quelquefois sous le nom de *pyro-électricité*. Le phénomène n'a pas été beaucoup étudié : il est probable que la charge électrique est due à une polarité, qui se développe dans la structure de la tourmaline et crée en réalité dans un cristal un système pareil à celui d'un aimant dont les extrémités jouissent de propriétés contraires. Les phénomènes électriques produits par le contact de deux métaux différents ont lieu, même quand la différence consiste simplement dans l'inégalité de trempe que peuvent présenter deux échantillons d'un seul et même métal ; un fil de cuivre recuit et un autre non recuit se comportent comme deux métaux différents, quoique leur composition chimique soit identique. On peut donc dire, si cette manière de voir est exacte, que partout où l'électricité est engendrée d'une manière directe, il faut le contact de deux substances différentes.

23. Les attractions et les répulsions produites par l'électricité ont été envisagées jusqu'à présent comme des phénomènes absolus ; à ce point de vue, elles se manifestent dans toutes les circontances. Mais si une plaque métallique non isolée D (*fig.* 14) est interposée entre un corps électrisé A et une balle de moelle de sureau B suspendue et isolée, toute attraction ou répulsion cesse ; il semble que la plaque métallique ne puisse être traversée par l'influence électrique, de même que les corps opaques ne peuvent être traversés par la lumière. Lorsqu'au contraire la plaque ou l'écran métallique est isolé (*fig.* 15), elle augmente l'attraction ou la répulsion au lieu de la détruire. Ces deux effets contrastants en appa-

rence sont dus à la distribution différente de l'électricité induite dans les deux cas.

Supposons que A soit électrisé positivement et que la plaque D ne soit pas isolée. Le corps A induit sur la face voisine de D une charge négative qui se répand sur une étendue considérable.

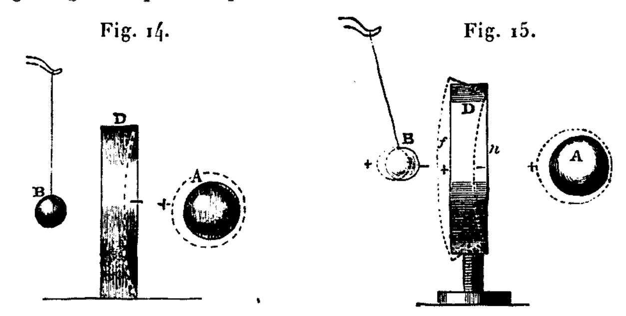


Fig. 14. Fig. 15.

Cette couche négative ainsi diffusée a pour effet de neutraliser à peu près complètement les attractions ou répulsions dues au corps A dans la région de l'espace située de l'autre côté de l'écran. Le chapeau métallique de l'électroscope (*fig.* 4) a pour but de mettre les feuilles d'or à l'abri des effets d'induction et ne doit pas être isolé; il faut, pour la même raison, que la cage de verre soit entièrement revêtue d'un treillis de fil de fer.

Supposons au contraire que la plaque D soit isolée. La face de D la plus éloignée de A est électrisée positivement comme A; la charge accumulée en *n* près de A et la charge de A se neutralisent à peu près l'une l'autre comme précédemment; mais la charge positive de la face *f* est alors libre d'exercer des attractions ou des répulsions, et le résultat est le même que si le corps A avait été avancé dans la direction de l'écran d'une quantité égale à l'épaisseur de cet écran.

On peut comprendre maintenant pour quelle raison une bouteille de Leyde, qui contient une très grande quantité d'électricité, n'exerce ni attraction ni répulsion sur les corps légers du voisinage. La charge intérieure qui est plus concentrée et la charge extérieure qui est plus diffusée neutralisent exactement leurs effets. Cette observation qui est rapportée ici comme un résultat expérimental peut aussi se démontrer théoriquement.

CHAPITRE II.

POTENTIEL.

1. Le mot *potentiel*, introduit dans la science par Green, n'a été adopté que dans ces derniers temps d'une façon générale par les électriciens ; il est souvent encore mal compris; cependant il exprime une idée très simple, et sa signification est bien distincte de celle qui caractérise tout autre terme relatif à l'électricité.

Comme on l'a déjà expliqué au Chapitre I (n° 10), on entend par différence de potentiel cette différence d'état électrique qui détermine le sens du mouvement de l'électricité d'un point à un autre; mais l'électricité ne peut pas ainsi se déplacer sans produire ou dépenser du travail; d'où la définition suivante : *On appelle différence de potentiel une différence d'état électrique en vertu de laquelle une masse d'électricité positive accomplit un travail en se transportant d'un point à potentiel plus élevé vers un point de moindre potentiel; elle a pour mesure la quantité de travail accompli par l'unité de quantité d'électricité positive ainsi déplacée.* L'idée de potentiel implique essentiellement une comparaison entre les états électriques de deux points ; ainsi, on ne peut dire simplement d'un point ou d'un corps qu'il a un potentiel propre, d'une valeur absolue et indépendante, si ce n'est pour la brièveté du langage. *Le potentiel d'un corps ou d'un point* est une expression abrégée qui sert à désigner la *différence entre le potentiel du corps ou du point et le potentiel de la terre.*

Ces définitions, pour être bien comprises, nécessitent des explications développées.

Les corps électrisés se repoussent et s'attirent réciproquement, et, par une simple extension, on dit qu'une quantité d'électricité positive attire une quantité d'électricité négative, mais repousse une quantité d'électricité positive. Si donc nous approchons une quantité d'électricité positive d'une autre quantité de même espèce, nous éprouvons une résistance susceptible d'être mesurée et équivalente, par exemple, au poids d'un certain nombre de grammes. Pour surmonter cette résistance, il faut effectuer un travail, de même qu'il y a nécessairement dépense de travail pour soulever un poids de 1^{kg} ou de 1^{gr}. Le travail accompli dans le déplacement d'un corps du point A au point B a pour mesure le produit de la distance de ces points par la résistance surmontée ; si le gramme est l'unité de force et le mètre l'unité de longueur, l'unité de travail sera le grammètre. Supposons, d'après cela, que pour déplacer une certaine quantité d'électricité de A à B nous ayons eu à vaincre une résistance de 10^{gr} sur une longueur de $1^{m},50$; nous aurons fait, durant cette opération, un travail égal à 15^{gm}. D'un autre côté, l'attraction ou la répulsion mutuelle des corps électrisés est une cause de production de travail, car le corps qu'on vient d'amener en B peut être repoussé en A par le seul jeu des forces électriques. Dans le premier cas, on dit que le travail est *dépensé sur* le corps électrisé par le fait même de son électrisation; dans le second cas, le même travail est *effectué par* le corps électrisé lui-même, en vertu de cette électrisation. En un langage moins exact, on peut dire que le travail est *dépensé sur* l'électricité ou *effectué par* elle. La mesure du travail est la même dans les deux cas qui correspondent : le premier, à la chute d'un corps tombant du niveau A au niveau B, et le second, au transport de ce corps du niveau B au niveau supérieur A.

2. Quand un corps électrisé se déplace d'un point à un autre, il peut arriver qu'à un moment donné un certain travail soit dépensé sur ce corps pour surmonter la résistance, et qu'en un autre point de la trajectoire le corps, poussé dans la direction de son propre mouvement, effectue lui-même un travail. Nous ne nous occupons

ici que du travail dépensé ou effectué par suite de l'état électrique du corps.

Le travail total exigé, par suite des attractions ou des répulsions électriques, pour transporter le corps électrisé d'un point A à un point quelconque B, est la somme algébrique des travaux effectués par le corps ou dépensés sur lui, les premiers étant considérés comme positifs et les seconds comme négatifs.

Supposons, par exemple, que, pour transporter le corps électrisé de A en B, on ait eu d'abord à vaincre une résistance et à dépenser sur lui un travail égal à 10^{gm}; puis, que le corps entraîné vers B effectue lui-même un travail égal à 30^{gm}, on dira que, dans le passage du point A au point B, le travail accompli par le corps est en définitive de 20^{gm}; il est vrai que, pendant une partie du trajet, le corps a effectué un travail plus grand que ce nombre, mais seulement avec l'aide et aux dépens d'un travail antérieur.

Le chemin suivi pour aller de A en B n'a aucune influence sur la valeur du travail total accompli. A cet égard l'analogie est complète entre l'électricité et la pesanteur. Un corps du poids de 1^{kg}, tombant d'une hauteur de 40^{m} à une hauteur de 20^{m} au-dessus du niveau de la mer, fait nécessairement un travail de 20^{kgm} en vertu de cette chute, quel que soit le chemin suivi. On peut, avant de le laisser tomber, l'élever au-dessus de A et dépenser ainsi un travail sur lui; la totalité du travail fait par le corps dans son passage de A en B et en vertu de sa chute sera toujours égale à 20^{kgm}. Soit qu'il tombe par le chemin le plus direct, soit qu'il fasse un détour immense, le travail accompli sera le même. Le corps peut descendre au-dessous du niveau de A et remonter ensuite jusqu'en A; la somme totale du travail demeure invariable, parce qu'elle ne dépend que de la différence de hauteur du premier et du dernier point. Ce travail peut être représenté de diverses manières; si le corps tombe directement dans le vide, il apparaît sous la forme d'énergie qu'on appelle *actuelle* ou *cinétique,* c'est-à-dire qu'il est intégralement représenté par le mouvement actuel du corps. D'un autre côté, si le corps tombe lentement, en soulevant un autre poids, le travail est représenté en partie par le poids soulevé et en partie par la chaleur due au frottement de l'appareil mécanique; mais le travail accompli par un corps qui tombe d'une hauteur à une autre a une

valeur constante, quelle que soit la forme sous laquelle il se présente. Le travail dépensé pour surmonter la résistance d'une force électrique ou accompli par cette force est soumis à la même loi.

3. Lorsqu'on transporte un corps pesant d'un point A à un point B supposé au même niveau, aucun travail n'est produit ni sur le corps ni par le corps sous l'influence de la pesanteur. De même, si un corps électrisé de faible dimension est transporté d'un point A à un autre point B, il peut arriver que ce point B soit situé de telle façon qu'au total aucun travail ne soit produit ni par le corps ni sur le corps, sous l'influence des forces électriques exercées par lui ou contre lui.

On pourrait dire que dans ce cas les deux points sont à la même *hauteur* ou au même *niveau électrique;* mais le terme adopté pour les forces électriques est celui de *potentiel.* Nous dirons donc que dans ce cas les points A et B sont *au même potentiel.* Supposons, par exemple, que le corps électrisé de faible dimension se meuve autour d'un autre corps électrisé de dimension considérable, sans se rapprocher ni s'éloigner de ce dernier, et à une assez grande distance de tous les autres conducteurs pour n'être ni attiré ni repoussé sensiblement par eux ; il parcourra une trajectoire dont tous les points seront au même potentiel électrique.

En réalité, quand on transporte un corps d'un endroit dans un autre, il faut toujours dépenser un travail pour vaincre le frottement; mais, de même que pour transporter un corps pesant d'un point à un autre *au même potentiel de gravitation,* c'est-à-dire *au même niveau,* aucun travail n'est produit sous l'influence de l'attraction terrestre, de même pour transporter un corps électrisé d'un point à un autre *au même potentiel électrique,* il n'est besoin d'aucun travail relativement aux forces électriques mises en jeu ; il est bien entendu qu'un travail sera certainement dépensé dans le mouvement du corps pesant pour vaincre le frottement, et pourra être dépensé pour surmonter l'attraction de la terre si le corps est élevé dans l'espace, ou pour triompher de l'inertie si le mouvement de la masse est accéléré.

4. Le *potentiel* d'un corps est la différence positive ou négative

qui existe entre son potentiel absolu et celui de la terre dans le voisinage; le potentiel de la terre en ce lieu, qu'on prend pour terme de comparaison, est supposé égal à zéro.

L'accroissement du potentiel d'un point est proportionnel à l'accroissement du travail effectué par une quantité donnée d'électricité qui se meut de ce point à la terre; puisque le potentiel est proportionnel au travail accompli et à la quantité d'électricité transportée et ne dépend d'aucun autre élément, on peut poser cette définition : *Le potentiel d'un point se mesure par le travail que l'unité de quantité d'électricité positive accomplit en passant de ce point à la terre.* L'unité de quantité d'électricité pourrait, d'après cette définition, être choisie arbitrairement; mais il y a avantage, dans un grand nombre de calculs, à adopter l'unité qui a été définie au Chapitre I (n° 17). On peut dire qu'un point quelconque de l'espace est à un potentiel électrique déterminé, comme on dit qu'il est à une hauteur déterminée au-dessus ou au-dessous d'un plan de comparaison choisi arbitrairement, par exemple, du plan horizontal mené suivant la ligne des hautes marées à la Trinité. En parlant du potentiel d'un point, il est inutile de concevoir en ce point la présence d'une certaine quantité d'électricité, comme il est inutile d'imaginer l'existence d'un corps pesant en un point de l'espace dont on donne la hauteur au-dessus du niveau de la mer.

5. Le potentiel électrique en un point de l'espace dépend de l'état électrique de tous les corps voisins, c'est-à-dire suffisamment rapprochés pour exercer une influence sensible sur un petit corps électrisé qui se trouverait en ce point. Lorsqu'on voudra reconnaître l'égalité des potentiels de deux points, en faisant la somme des travaux dépensés ou produits dans le mouvement d'un corps électrisé de l'un de ces points à l'autre, somme qui doit être nulle, on n'oubliera pas qu'il faut choisir un corps ne contenant qu'une très faible charge d'électricité appelée *charge d'épreuve;* s'il en était autrement, la seule présence de ce corps ou de cette charge électrique d'épreuve modifierait sensiblement le potentiel du point soumis à l'expérience, en augmentant ou en diminuant présentement le travail nécessaire pour amener en ce point toute autre petite

quantité d'électricité. Au premier abord, il semble que l'analogie de la pesanteur nous abandonne ici; mais il n'en est rien. En effet, si l'on convient de dire que deux points A et B sont au même niveau relativement à la terre, quand aucun travail n'est effectué ni dépensé pour transporter un corps pesant de l'un de ces points à l'autre, il faut se rappeler qu'en plaçant un corps pesant au point A on change pour l'instant le niveau de ce point, si ce corps a une dimension appréciable par rapport à la terre ; car sa présence en A a augmenté l'attraction de tous les autres corps pesants dirigée vers A, de sorte que dans l'état actuel un petit corps passant de A à B effectue un travail. La position du centre de gravité de la terre a été changée.

6. La différence de potentiel entre deux points A et B est, comme on sait, la différence d'état électrique en vertu de laquelle l'électricité produit un travail en passant de l'un à l'autre; par suite, elle a pour mesure le travail dépensé pour transporter de A en B une unité d'électricité à l'encontre des répulsions électriques, ou, ce qui est la même chose, le travail qu'une unité d'électricité effectue en se portant d'elle-même de B en A en vertu des attractions électriques.

On dit que le point A a un potentiel plus élevé que B, si l'unité d'électricité positive passant de A en B effectue un travail. On admet que l'unité d'électricité ne trouble point la distribution de l'électricité dans le voisinage.

La notion du travail nécessairement effectué par l'électricité ou dépensé sur elle, dans le passage d'un point à un autre, est une idée que notre esprit doit retenir comme la seule qui puisse nous expliquer le sens de ces mots : *différence de potentiel*. Lorsqu'on dit que divers corps sont au même état électrique, il faut entendre par là qu'ils sont au même potentiel. Une différence de potentiel sera représentée par une quantité de travail exprimée en kilogrammètres ou par toute autre unité de travail reconnue et acceptée.

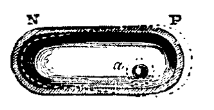
Dans ce paragraphe, nous avons dit à plusieurs reprises qu'un travail était produit par l'électricité, simplement pour éviter de longues périphrases comme celle-ci : « travail effectué par un petit corps électrisé chargé d'une unité d'électricité » ; ou : « travail dépensé

à l'encontre des résistances engendrées par la charge électrique. » En d'autres termes, c'est le travail spécial produit dans le transport du corps d'une place à une autre, par le seul fait qu'il est électrisé.

7. Appliquons cette définition à des cas particuliers.

En premier lieu nous considérerons un conducteur chargé d'électricité au repos; la distribution de sa charge dépend de sa propre forme ainsi que de la forme et de la position des conducteurs environnants. Les divers points de la surface d'un pareil conducteur sont tous au même potentiel. Si un point A était à un potentiel plus élevé qu'un autre point B, l'électricité de A s'écoulerait vers B, et ce flux est aussi réel que la chute d'un corps qui tombe d'un niveau plus élevé à un niveau inférieur sans rencontrer aucune résistance. Or, il n'y a sur le conducteur aucun obstacle qui s'oppose au libre mouvement de l'électricité. Que l'une des extrémités du conducteur soit électrisée positivement et l'autre négativement; que la partie médiane n'ait aucune charge sensible comme dans le corps B (*fig.* 6), tous les points de la surface n'en seront pas moins au même potentiel; car un corps électrisé de faible dimension pourra être promené sur toute la surface du corps sans qu'il soit attiré ou repoussé dans une direction quelconque par les forces électriques. A l'intérieur du conducteur, tous les points sont aussi au même potentiel que ceux de la surface extérieure, quoique aucune charge électrique ne soit constatée en un point quelconque de l'intérieur. Si la petite charge d'épreuve est introduite dans une cavité quelconque à l'intérieur d'un corps électrisé, elle est également libre de se mouvoir dans toutes les directions, et, par suite, elle se trouve en état d'équilibre électrique. Au premier aspect, il semble qu'à l'extérieur ou à l'intérieur du corps une unité *a* d'électricité positive (*fig.* 16) doit être attirée par la charge négative de l'extrémité N et repoussée par la charge positive de l'autre extrémité P du conducteur NP. Mais, en raisonnant ainsi, nous perdons de vue l'influence du conducteur extérieur voisin M, qui a produit la distribution de la charge sur NP. La

Fig. 16.





charge d'épreuve, à quelque endroit qu'elle soit appliquée, n'a aucune tendance à se mouvoir dans une direction plutôt que dans une autre; mais elle fait effort pour se subdiviser, et présente finalement, sur le vaste conducteur NP, le même mode de distribution que la charge primitive.

8. Considérons maintenant l'espace qui entoure un conducteur chargé, espace nécessairement rempli par l'air ou tout autre milieu isolant. D'abord, nous supposerons que le conducteur est chargé uniformément de l'une des deux espèces d'électricité, comme le serait une sphère au centre d'une salle sphérique (*fig.* 17). La portion de l'espace contiguë à la sphère est à très peu près au même potentiel que la sphère; car la charge d'épreuve n'aura que très peu de travail à effectuer pour atteindre la sphère, si celle-ci exerce une attraction; ou bien il n'y aura que très peu de travail à dépenser sur la charge d'épreuve pour la ramener vers la sphère, s'il y a répulsion. Admettons que le potentiel de la sphère soit positif et que la charge d'épreuve soit aussi positive; dans ce cas, le potentiel de l'espace qui entoure la sphère va en diminuant, tout en restant positif, à mesure qu'on s'éloigne de la sphère. Le travail nécessaire pour ramener la charge d'épreuve sur la sphère s'accroît avec la distance de la charge à la sphère, quoique la force avec laquelle elle est repoussée aille en diminuant. Ici encore le cas est analogue à celui de la pesanteur; le travail qu'un corps effectue en tombant vers la terre s'accroît avec la hauteur de la chute, bien que l'attraction de la terre diminue à mesure que le corps est plus éloigné de sa surface.

9. Lorsque la charge d'épreuve se rapproche du mur de la salle qui contient la sphère chargée positivement, elle se rapproche en même temps d'une charge d'électricité négative et est de plus en plus attirée par celle-ci. Cette attraction augmente encore le travail nécessaire pour ramener la charge d'épreuve sur la sphère électrisée, et, par suite, la chute du potentiel en ces points de l'espace est de plus en plus rapide.

La chute s'accélère jusqu'à ce que la charge d'épreuve touche le mur de la salle, et l'on voit ainsi que ce mur est à un potentiel plus

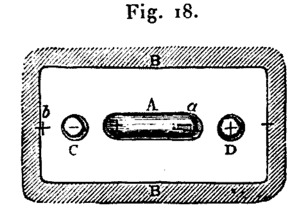
bas que la sphère chargée. Si nous avions supposé une charge négative sur la sphère intérieure, nous aurions trouvé pour le mur de la salle un potentiel plus élevé que celui de la sphère. Ainsi, on conclut qu'il y a nécessairement une différence de potentiel entre les armatures intérieure et extérieure d'une bouteille de Leyde, ou, en général, que deux conducteurs quelconques, entre lesquels une induction se produit, doivent être à des potentiels différents.

Le potentiel diminue à mesure qu'on s'éloigne de la sphère vers le conducteur qui l'entoure; mais toutes les surfaces sphériques concentriques sont au même potentiel, ou, en d'autres termes, on peut, en ne tenant compte que des forces électriques, promener la charge d'épreuve sur chacune des surfaces sphériques concentriques représentées par les circonférences p_1, p_2, p_3 de la *fig.* 17, sans produire ni dépenser aucun travail. Quelle que soit la forme du corps électrisé intérieur, on peut imaginer dans le diélectrique qui l'entoure des surfaces équipotentielles de ce genre; la forme de ces surfaces dépend des conducteurs extérieur et intérieur.

On peut même concevoir des surfaces équipotentielles successives, séparées les unes des autres par des distances telles, que la même somme de travail soit effectuée par la charge d'épreuve, en passant de l'une de ces surfaces à la suivante. Une somme égale de travail serait nécessaire pour ramener la charge d'épreuve de l'une quelconque de ces surfaces à la surface précédente et de potentiel plus élevé.

Fig. 17.

Fig. 18.



10. Considérons le cas plus complexe d'un corps chargé en partie d'électricité positive et en partie d'électricité négative, mais ayant partout le même potentiel. Ces conditions supposent une distribution d'électricité compliquée dans les corps voisins, par exemple, celle qui est représentée dans la *fig.* 18.

Très près de la surface du conducteur A, le potentiel du diélectrique est sensiblement le même que celui de A; rien n'indique ici si le potentiel de A est positif ou négatif par rapport à l'ensemble du système conducteur qui l'entoure. Mais, quand on avance de A vers C, le potentiel de l'espace s'abaisse; au contraire, quand on avance de A vers D, il s'élève. Si l'on continue à s'avancer avec la charge d'épreuve de D vers l'enveloppe B, le potentiel baisse; il monte, lorsqu'on passe de C à l'enveloppe. Tout près de B, le potentiel est le même en tous les points. Mais est-il supérieur ou inférieur à celui de A? Rien dans la disposition de la figure ne nous l'apprend. Toutes ces conclusions se déduisent de la simple conception du travail nécessaire pour porter la charge d'épreuve fictive d'un endroit à un autre endroit. Aucune idée plus simple ne saurait être imaginée. On voit, d'après la *fig.* 18, qu'un corps chargé d'électricité négative peut avoir un potentiel positif par rapport à un point chargé d'électricité positive, et réciproquement; car le corps A peut parfaitement être à un potentiel positif relativement au corps B, quoique la partie *a* de ce conducteur soit chargée négativement, et que certains points de B, par exemple *b*, soient chargés positivement.

11. Les charges réciproquement induites entre deux conducteurs, séparés par un diélectrique, entraînent nécessairement, comme on vient de le voir, une différence de potentiel entre ces conducteurs. Lorsque cette différence des potentiels augmente, les charges induites doivent augmenter elles-mêmes; car, pour qu'il devienne de plus en plus difficile de transporter la charge d'épreuve d'une surface à l'autre, il faut qu'il y ait accroissement de la répulsion par l'une et de l'attraction vers l'autre; or, cette attraction et cette répulsion ne peuvent s'accroître que si les quantités d'électricité s'accroissent. Quand la différence des potentiels entre les surfaces demeure constante, la charge des surfaces doit demeurer constante elle-même. Les deux potentiels peuvent monter ou descendre ensemble; pourvu que leur différence soit constante, la charge reste constante sur les surfaces opposées.

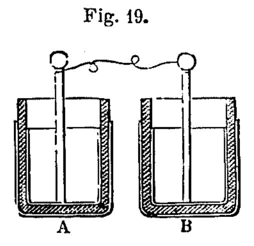
Un exemple va éclaircir ce qui précède. Supposons qu'une bouteille de Leyde ordinaire soit chargée d'électricité négative et qu'elle

ait son armature extérieure en communication avec la terre. Le potentiel de l'armature intérieure sera négatif par rapport à la terre, et si l'on prend pour zéro le potentiel de la terre, comme on le fait d'ordinaire pour abréger, on dira simplement (n° 4), que le potentiel de l'armature intérieure de la bouteille est négatif. Il y aura sur la face interne de l'armature extérieure de la bouteille une charge d'électricité positive égale à la charge négative de l'intérieur.

Isolons l'armature extérieure et chargeons-la d'électricité positive. Son potentiel sera augmenté, mais le potentiel de l'armature intérieure augmentera de la même quantité. A l'intérieur de la bouteille, la charge négative conservera une valeur invariable, et il en sera de même de la charge positive opposée sur la face interne de l'armature extérieure; il n'y a d'autre changement introduit que la présence d'une charge positive sur la face externe de l'armature extérieure. L'effet de cette charge positive additionnelle sera d'augmenter le travail nécessaire pour amener la charge d'épreuve d'un point quelconque éloigné de la bouteille à un autre point pris sur sa surface ou dans son intérieur; en d'autres termes, les potentiels des deux armatures et de tous les points extérieurs ont été portés à une valeur plus élevée.

12. Supposons maintenant que deux bouteilles de Leyde (*fig.* 19),

Fig. 19.



dont les armatures intérieures communiquent électriquement, soient chargées d'électricité négative, les armatures extérieures n'étant pas isolées et, par suite, se trouvant au potentiel de la terre; le potentiel des armatures intérieures sera négatif, et, si les deux bouteilles sont identiques à tous égards, la charge négative de l'une

sera égale à la charge négative de l'autre. Isolons la bouteille A et augmentons le potentiel de son armature extérieure en l'électrisant positivement. La charge négative va se répartir entre les deux bouteilles d'une façon différente.

Le potentiel de l'armature extérieure de B demeure constant. Les armatures intérieures de A et de B ont le même potentiel dans toute leur étendue, puisqu'elles sont en communication métallique. Ce potentiel commun sera un peu augmenté, mais non pas autant que celui de l'armature extérieure de A ; par suite, la différence de potentiel entre les armatures de A sera augmentée ainsi que la charge intérieure de A. Ce résultat sera obtenu aux dépens de B, en sorte que pour B la différence de potentiel entre les armatures intérieure et extérieure aura diminué.

13. Lorsqu'une armature d'une bouteille de Leyde est maintenue à un potentiel constant, par exemple à celui que la terre possède en général sur le lieu de l'observation, la quantité d'électricité que l'autre armature contient est simplement proportionnelle à son potentiel : c'est un fait constaté par l'expérience. Si donc on a un moyen de rendre ce potentiel constant ou plutôt de rendre constante la différence entre ce potentiel et celui de la terre, on aura aussi un moyen d'accumuler sur l'armature une quantité constante d'électricité.

La charge possédée par un conducteur isolé, situé à l'intérieur d'une enveloppe conductrice aussi éloignée que l'on voudra, est simplement proportionnelle à la différence des potentiels de ce conducteur et de l'enveloppe. Si celle-ci s'éloigne de plus en plus, on peut dire que la charge sur le conducteur, lorsqu'il n'y a pas de corps électrisé dans le voisinage, est, à la limite, simplement proportionnelle au potentiel du conducteur, c'est-à-dire à la différence entre son potentiel et celui de la terre.

La force qu'il exerce est proportionnelle à cette charge, et le travail dépensé pour vaincre cette force est proportionnel à l'intensité de celle-ci.

14. Dans une bouteille de Leyde, il importe peu soit de relier à la terre l'une ou l'autre des armatures, soit de les tenir toutes

deux isolées. La communication avec le sol n'a d'autre objet que de maintenir constant ou à peu près constant le potentiel de l'une des armatures, en reliant celle-ci à un conducteur de dimension considérable. Quand l'armature intérieure d'une bouteille de Leyde est mise en communication avec la terre, elle prend une charge négative si l'armature extérieure est électrisée positivement; la différence des potentiels étant la même, cette charge aura exactement la même valeur que si l'armature extérieure avait été mise en communication avec le sol et l'armature intérieure électrisée directement avec de l'électricité négative.

15. Examinons la construction des électroscopes à l'aide des connaissances que nous avons maintenant acquises; nous prendrons pour exemple l'électroscope à feuilles d'or (*fig*. 20).

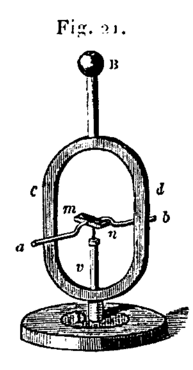
Fig. 20.

La répulsion qui se produit entre les deux feuilles d'or *a* et *b* dépend de la quantité d'électricité dont elles sont chargées. Mais de quel élément dépend cette quantité elle-même? Simplement de la différence entre le potentiel des feuilles d'or et celui des conducteurs *c* et *d* qui les entourent immédiatement. Quand les feuilles d'or *a* et *b* sont mises en communication avec le corps électrisé A soumis à l'expérience, ces feuilles et le corps A prennent le même potentiel; la quantité d'électricité accumulée sur les feuilles d'or dépend alors de la différence entre ce potentiel et celui des corps voisins *c* et *d*. Supposons que *c* et *d* soient isolés et au même potentiel que A; alors, quelle que soit la charge accumulée sur A, aucune trace d'électricité ne passera sur les feuilles d'or *a* et *b*, et celles-ci ne montreront aucune divergence.

Dans les électroscopes ordinaires, une partie des conducteurs environnants *c* et *d* est faite en verre, et leur potentiel dépend de conditions qui échappent entièrement à notre contrôle; il vaut mieux que les conducteurs *c* et *d* soient contenus dans une enveloppe métallique pourvue d'ouvertures qui permettent de voir *a* et *b*; on disposera par exemple, sur le contour d'une cage en verre,

un treillis métallique dont les mailles soient assez serrées pour maintenir la totalité de la surface du verre au même potentiel; si *c* et *d* sont mis alors en communication avec la terre, *a* et *b* se chargent d'électricité toutes les fois qu'il y a une différence de potentiel entre A et la terre. Un raisonnement identique s'applique à l'électroscope de Peltier (*fig.* 21). Dans cet instrument se trouve, au lieu de feuilles d'or, une tige *ab*, qui se meut librement sur un axe vertical *v*, et est repoussée à chacune de ses extrémités par un conducteur fixe *cd* en communication électrique avec elle : ce système repose sur un support isolant D; la tige est dirigée par un petit aimant *mn*. L'instrument est orienté de telle sorte que la tige soit amenée par l'aimant tout près du conducteur fixe *cd*, quand ce dernier ne possède aucune charge électrique. Lorsque B et par suite *ab* sont chargés d'électricité, la tige *ab* est repoussée jusqu'à ce que la force de répulsion électrique soit exactement contrebalancée par la force directrice de l'aimant. La force électrique dépend de la quantité d'électricité accumulée sur la tige *ab* et sur les boutons qui la terminent; mais cette quantité est proportionnelle à la différence de potentiel entre le système B*cd*..., et le conducteur enveloppant A qu'on ne voit pas dans la figure, mais qui renferme l'ensemble du système isolé B*cd*. Ainsi cet électroscope, comme le précédent et comme tous les autres, indique la différence de potentiel d'après la quantité d'électricité que cette différence fait naître sur un conducteur isolé.

Fig. 21.



Dans la plupart de ces instruments se trouve un cercle divisé qui montre la déviation de la tige *ab*. Avec l'électroscope Peltier, on reconnaît plus commodément qu'avec l'électroscope à feuilles d'or si un potentiel donné est plus haut ou plus bas qu'un autre; mais comme les déviations ne sont pas proportionnelles à la différence de potentiel entre *ab* et la cage A, et ne sont même liées à cette différence par aucune loi simple, on ne peut pas se servir de l'électroscope Peltier pour *mesurer* la différence des potentiels, c'est-à-dire pour comparer deux potentiels ou plutôt deux différences de potentiel avec une précision qui nous permette d'affirmer

que l'une est exactement double, triple ou quadruple de l'autre. Pour arriver à ce résultat, il faut des appareils plus compliqués appelés *électromètres,* c'est-à-dire des instruments où les forces attractives et répulsives produites par des différences de potentiel données entre certaines pièces de l'appareil peuvent être définies et calculées avec exactitude.

Tous les électromètres mesurent directement les différences des potentiels; ils ne fournissent qu'indirectement les quantités d'électricité.

16. Lorsque deux conducteurs électrisés A et B supposés au même potentiel sont réunis par un fil, aucun changement ne se produit dans la distribution de l'électricité sur ce système, à moins que le fil n'ait une dimension sensible par rapport aux autres conducteurs et ne soit en même temps à un potentiel différent. Si ce fil est de petite dimension, ou bien si, étant de grande dimension, il est au même potentiel que A et B, l'électricité répandue sur ces deux corps sera en équilibre après comme avant leur réunion, la condition nécessaire de l'égalité de potentiel étant satisfaite dans toute l'étendue du système conducteur. Lorsqu'au contraire A est à un potentiel plus élevé que B, un flux d'électricité positive se produit de A vers B dès que la communication a lieu, et rétablit l'équilibre électrique. La quantité d'électricité ainsi transportée est précisément celle qui est nécessaire pour ce retour à l'état d'équilibre; elle est considérable si la différence de potentiel est considérable et si les corps sont de grande dimension; elle est faible dans les conditions contraires. La production de ce flux d'électricité d'un point à un autre et sa persistance dépendent uniquement de la différence de potentiel entre ces deux points; les dimensions des conducteurs n'ont d'effet que sur l'intensité du résultat en déterminant le transport d'une quantité d'électricité plus grande, si le conducteur est plus considérable, pour le rétablissement de l'équilibre. On peut rendre cette explication plus claire à l'aide d'une expérience faite sur l'eau. Lorsqu'on réunit par un tuyau deux réservoirs, l'un de grande et l'autre de petite dimension, aucun écoulement ne se produit de l'un à l'autre réservoir quand l'eau s'y trouve au même niveau. S'il n'en est pas ainsi, l'écoulement a

lieu du niveau le plus élevé au niveau inférieur; la quantité d'eau déplacée dépend de la capacité des réservoirs et de la différence primitive des niveaux; l'écoulement continue jusqu'à ce que le niveau devienne le même dans les deux réservoirs. Substituez les mots *potentiel*, *électricité* et *conducteur* aux mots *niveau, eau* et *réservoir;* les principes qu'on vient d'énoncer sont de tous points applicables à l'électricité.

17. Lorsqu'on met l'une des extrémités d'un fil en communication avec la terre et qu'on place l'autre extrémité en un point A de l'espace (qui peut se trouver à un potentiel très élevé), aucun mouvement électrique ne se produit à travers ce fil du point A à la terre, par la simple raison qu'il n'y a pas d'électricité condensée en ce point : sa capacité et sa charge sont nulles; mais son potentiel a été changé par la seule présence du fil et est devenu celui de la terre; en même temps que le fil se rapprochait du point A, une distribution nouvelle d'électricité s'opérait à sa surface sous l'influence de l'induction à laquelle est dû le potentiel de A.

Si le fil présente à son extrémité une pointe aiguë, de façon qu'une quantité très petite d'électricité puisse y produire une densité considérable, un transport d'électricité s'effectue du point A de l'espace à la terre; des particules d'air, chargées négativement, semblent s'échapper une à une de la pointe, et sont remplacées par d'autres particules d'air, chargées positivement, qui viennent se décharger une à une sur la surface de la pointe. Lorsque le potentiel du point considéré est suffisamment élevé, le phénomène est accompagné de bruit et d'une aigrette lumineuse.

Une allumette enflammée, posée sur l'extrémité du fil, facilite aussi le transport de l'électricité; les gaz provenant de la combustion fuient la pointe avec une charge négative, tandis que l'air environnant, destiné à la combustion, apporte sur le fil une électricité de signe contraire.

18. Suivant la définition que nous avons adoptée, la différence de potentiel dépend du travail effectué par l'électricité ou dépensé sur elle, dans son transport d'un point à un autre. Le travail dépensé à l'encontre d'une force électrique, attractive ou répulsive,

ou effectué par elle, quand une masse d'électricité se déplace sur un conducteur, a été clairement défini dans sa nature : une force d'un effet tangible est, dans le premier cas, vaincue comme résistance, et, dans le second, utilisée comme puissance; la masse électrique est dans les mêmes conditions qu'un corps matériel en mouvement sollicité par une force ou accélératrice ou retardatrice. Mais quand une certaine quantité d'électricité passe, à travers un fil, d'un conducteur à un potentiel donné sur un autre dont le potentiel est différent, il n'y a aucun corps matériel en mouvement, et aucun travail équivalent ne semble au premier abord avoir été accompli.

L'équivalent se trouve pourtant dans la chaleur développée dans le fil par le passage de l'électricité. Tout le monde sait que, d'après les recherches de Joule, 425^{kgm} équivalent à la quantité de chaleur qui élève 1^{kg} d'eau de 1° C. Or, s'il est vrai qu'aucun travail mécanique visible ne soit accompli quand une quantité Q d'électricité passe, à travers un fil, de A en B, il y a génération de chaleur en quantité précisément équivalente au travail qui serait produit par les attractions et répulsions des corps électrisés A et B, dans le cas où ces forces agiraient sur la même quantité d'électricité Q, portée par un petit conducteur en mouvement du corps A vers le corps B.

On verra que l'électricité en mouvement est capable de produire du travail de diverses autres manières ; mais, quelle que soit la forme du travail fourni par une quantité d'électricité transportée de A à B, la valeur de ce travail est toujours égale au produit de la quantité d'électricité déplacée par l'excès du potentiel de A sur B.

19. Une différence de potentiel peut être produite par la seule induction. Si l'on suppose qu'un petit conducteur isolé soit placé en un point quelconque de l'espace dont le potentiel, déterminé par les corps électrisés du voisinage, est A, ce conducteur prend lui-même le potentiel A, sans perdre ni gagner de l'électricité. Lorsqu'il est mis en communication avec la terre, de l'électricité s'écoulera du conducteur à la terre ou inversement, en quantité suffisante pour amener le conducteur au potentiel de la terre;

lorsque A est positif, le courant a lieu vers la terre; lorsque A est négatif, le courant se dirige de la terre vers le conducteur.

20. Une différence de potentiel est produite par le frottement de deux corps isolants qu'on sépare ensuite. Deux corps isolants, frottés l'un contre l'autre, sont électrisés en sens contraire, et il en résulte une différence de potentiel entre eux. Il est probable que pour chaque couple de substances frottées ensemble il y a une différence de potentiel maximum qui ne peut pas être dépassée. La liste qui figure au Chapitre I (nº 9) contient diverses substances classées de telle façon que chacune devient positive quand elle est frottée avec l'une quelconque des substances placées après elle; cette même liste représente aussi l'ordre de ces substances classées de telle façon que, si l'une est touchée ou frottée avec une autre placée après elle, le potentiel de la première soit positif par rapport au potentiel de la seconde. D'ailleurs, la différence de potentiel produite par le frottement est d'autant plus grande que les deux substances frottées sont plus éloignées l'une de l'autre sur le tableau. Ajoutons qu'il est possible que la loi énoncée dans le paragraphe suivant pour les corps bons conducteurs soit encore vraie pour les corps isolants.

21. Lorsque deux conducteurs hétérogènes sont amenés au contact, une différence de potentiel se produit entre eux, comme on l'a indiqué au Chapitre I (nº 19). Cette différence est constante avec les mêmes substances; ainsi, lorsque du cuivre et du zinc, à une température déterminée, sont en contact, leurs potentiels présentent une différence mesurable et constante. On peut dire la même chose de deux métaux quelconques. Tous les conducteurs métalliques peuvent être rangés dans un ordre tel que l'un quelconque d'entre eux, mis en contact avec un autre conducteur classé après lui, ait un potentiel positif par rapport à ce dernier.

Soient A, B, C, D,... divers corps de ce tableau.

La différence de potentiel entre A et C est égale à la différence de potentiel entre A et B, augmentée de la différence de potentiel entre B et C; la différence de potentiel entre A et D est égale à la précédente augmentée de celle entre C et D, et ainsi de suite. En

général, si l'on suppose une série de corps en contact deux à deux et dans l'ordre suivant A, B, C, D,..., N, et si l'on représente les potentiels de ces corps par a, b, c, d,..., n, on aura

$$a - n = (a - b) + (b - c) + (c - d) + \ldots + (m - n).$$

Supposons que trois corps soient en contact comme dans la *fig.* 22.

Fig. 22.

−		+
or	*cuivre*	*zinc*
A		B

La différence de potentiel des deux extrémités A et B peut s'exprimer au moyen des potentiels des deux métaux extrêmes, sans qu'on ait à s'occuper du métal intermédiaire; si l'on représente en effet par a, b et c les potentiels de l'or, du cuivre et du zinc, on aura

$$(a - b) + (b - c) = a - c$$

pour la différence de potentiel entre l'or et le zinc. Cette différence est, comme on le voit, la même que si l'or et le zinc étaient mis directement en contact. On peut établir, d'une manière absolument générale, que, dans une série quelconque de conducteurs métalliques, ainsi mis en contact, la différence de potentiel des deux extrémités dépend des conducteurs extrêmes de la série. Dans la liste suivante, les conducteurs sont rangés dans un ordre tel, que chacun d'eux devient positif quand il est en contact avec un quelconque des conducteurs classés après lui.

Zinc.	Bismuth.
Plomb.	Cuivre.
Étain.	Argent.
Fer.	Or.
Antimoine.	

Les métaux qui occupent les premiers rangs sur cette liste sont appelés *électropositifs* par rapport aux suivants. Jusqu'à présent, on n'a reconnu expérimentalement que dans un petit nombre de cas les valeurs relatives exactes des différences de potentiel fournies par le contact des métaux.

22. On est porté à croire que tous les composés solides, qui sont conducteurs, se comportent de la même manière que les conducteurs métalliques ordinaires, au point de vue de la production d'une différence de potentiel par le simple contact; et le fait est certainement vrai dans un grand nombre de cas. Les conducteurs liquides semblent aussi susceptibles d'être classés les uns par rapport aux autres en une série analogue. Mais les corps composés, liquides et solides, ne se prêtent pas à une classification aussi simple que celle qui a été appliquée aux métaux.

Cette différence d'action entre les métaux simples et les métaux composés liquides semble être intimement liée à ce fait, que l'électricité en traversant ces liquides les décompose, phénomène qui sera décrit plus tard avec détail. Les liquides qui sont ainsi décomposés s'appellent des *électrolytes*. Quand des métaux et des électrolytes sont mis en contact, ils donnent lieu à la série de faits qui suivent:

1° Lorsqu'un métal unique est mis en contact avec un liquide électrolyte, une différence de potentiel déterminée est produite entre le liquide et le métal. Pour le même métal et le même liquide, la différence de potentiel est constante à la même température dans toutes les circonstances; mais de légères différences dans l'état du métal ou du liquide amènent souvent des variations considérables dans la différence de potentiel observée.

2° Lorsque deux métaux non en contact sont plongés dans un liquide électrolyte, comme dans la *fig.* 23, chacune des surfaces de

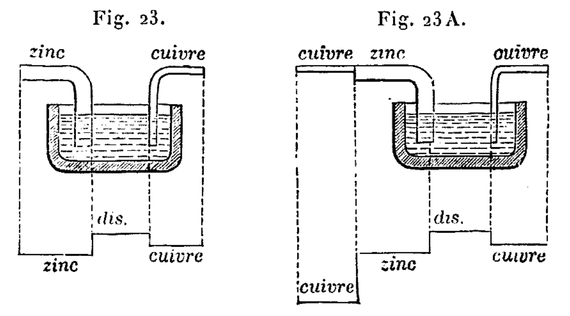


Diagramme du potentiel.

séparation produit son effet indépendamment de l'autre, en sorte

que la différence de potentiel entre les métaux est la somme des différences de potentiel entre chaque métal et le liquide, ces différences étant toujours prises en allant dans le même sens et, pour fixer les idées, de droite à gauche. Supposons qu'il s'agisse du cuivre, du zinc et d'une dissolution de sulfate de zinc : les nombres qui suivent expriment, au moyen d'une unité appelée *volt*, les différences de potentiel entre ces diverses substances deux à deux ; le signe de chacun de ces nombres indique que la substance dénommée la première est positive ou négative par rapport à celle dénommée en dernier lieu.

Cuivre ; ... dissolution de sulfate de zinc......... $-0,113$
Dissolution de sulfate de zinc ; ... zinc............ $+0,358$

Si les deux métaux sont simplement plongés dans la dissolution comme dans la *fig.* 23, on a pour la série :

Cuivre ; ... dissolution de sulfate de zinc ; ... zinc,

une différence de potentiel égale à $-0,113+0,358=+0,245$. Le cuivre sera positif par rapport au zinc et son potentiel sera $0,245$ de l'unité adoptée.

3° Réunissons maintenant le zinc à une plaque de cuivre, de manière à former l'élément de pile complet que représente la *fig.* 23 A, et supposons que la différence de potentiel due au contact zinc-cuivre soit $+0,75$. Dans ce cas, comme dans le cas précédent, chacune des surfaces de séparation développe intégralement la différence de potentiel qui lui correspond, et la différence de potentiel entre la première et la dernière substance de la série est la somme algébrique des différences prises séparément et en allant toujours dans le même sens. Cette somme est

$$-0,113+0,358+0,75=+0,995\,;$$

le cuivre plongé dans la dissolution est donc positif par rapport au cuivre soudé au zinc, et la différence de potentiel entre ces deux corps est d'environ une unité.

Si plusieurs éléments de pile sont réunis comme l'indique la *fig.* 13, la différence de potentiel entre la première plaque de cuivre et le fil de cuivre attaché au dernier zinc est égale à la

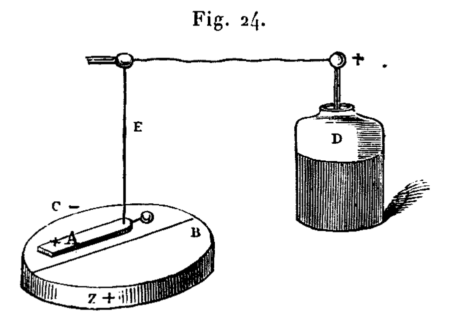
somme des différences produites sur toutes les surfaces de séparation, ou, en d'autres termes, à la somme des différences produites par chaque élément. Ainsi 40 éléments donneront une différence de potentiel égale à $40 \times 0,995$ ou 39,8 volts, le volt étant l'unité de potentiel que nous avons choisie.

La distribution des potentiels pour les éléments complet et incomplet est figurée par les diagrammes placés au-dessous des *fig.* 23 et 23 A.

Dans certains cas, les différences de potentiel que développent deux métaux et un électrolyte sont égales et de signe contraire, et quand on les ajoute, elles se détruisent. Les deux métaux sont alors au même potentiel. Volta pensait qu'il en est toujours ainsi, et cette théorie a été provisoirement adoptée dans les premières éditions de cet Ouvrage, comme conséquence d'une expérience de sir William Thomson, qu'on va décrire, et dans laquelle les différences de potentiel se détruisent effectivement. La théorie présentée aujourd'hui est fondée sur les expériences de Gerland, de MM. Perry et Ayrton, et du professeur Clifton. On la trouvera exposée avec détail au Chapitre XV (nº 5).

Disposez un disque métallique B (*fig.* 24) au-dessous d'une

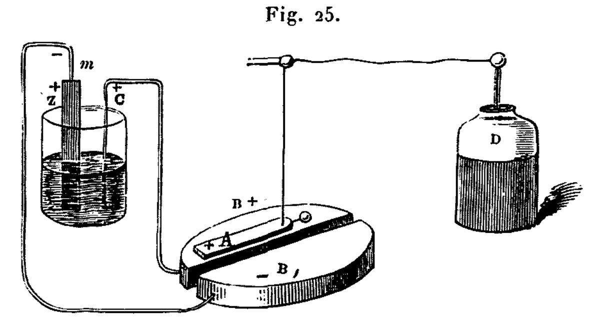
Fig. 24.



bande ou aiguille de métal A, légère et plate, suspendue au fil E; cette aiguille est maintenue à un potentiel positif élevé, ce qu'on obtient en la reliant à l'une des armatures d'une bouteille de Leyde fortement chargée. Lorsque le disque est formé d'un seul et même métal, l'aiguille A n'est déviée ni à droite ni à gauche

par la présence de B. Une charge s'accumule sur A et sur B quand ces deux corps sont approchés en face l'un de l'autre; mais comme la charge de B est distribuée symétriquement par rapport à A, l'aiguille A est simplement attirée vers B et ne tend pas à tourner autour de l'axe ou du fil de suspension E. Supposons que le disque B soit formé de deux métaux, par exemple de zinc et de cuivre, la ligne de séparation étant d'ailleurs placée sous la face même de l'aiguille A; celle-ci ne demeure plus en équilibre et dévie du côté du cuivre, montrant ainsi que la charge n'est plus distribuée symétriquement et qu'il y a une charge induite plus considérable sur le cuivre que sur le zinc. Entre l'aiguille et le cuivre il y a donc une différence de potentiel plus grande qu'entre l'aiguille et le zinc; en d'autres termes, une différence de potentiel est produite par le contact du zinc et du cuivre, le zinc étant positif par rapport au cuivre. Si le potentiel de A est négatif au lieu d'être positif, la déviation se produit en sens contraire. Les deux moitiés de disque, toujours reliées métalliquement par un fil, peuvent être séparées l'une de l'autre par un petit intervalle, comme le montre la *fig.* 25. L'aiguille ne dévie pas lorsque ces deux moitiés sont de

Fig. 25.



même métal; elle dévie d'une quantité déterminée quand elles sont formées de deux métaux différents, par exemple de zinc et de cuivre, placés en B et B_1; la déviation *d* est, comme précédemment, dirigée du zinc vers le cuivre, si A est positif. En faisant cette expérience, on doit s'assurer que les deux moitiés de disque sont disposées symétriquement à droite et à gauche de A. S'il en est autrement, des déviations se produisent sous l'influence des charges inégales

induites de part et d'autre de A, même quand B et B_1 sont au même potentiel. Pour s'assurer que cette condition de symétrie est satisfaite, on renverse le potentiel de A à diverses reprises, en le faisant alternativement positif et négatif et de même valeur absolue : il faut que des déviations égales et de sens contraire soient accusées par l'appareil.

Supposons que deux demi-disques en cuivre soient ainsi soigneusement ajustés au-dessous de A. Quand on les relie par une communication métallique, aucune déviation n'est produite, quelque haut que soit le potentiel de A. Vient-on à réunir le demi-disque B au pôle cuivre d'un élément de pile et le demi-disque B_1 au pôle zinc (*fig.* 25), l'aiguille A dévie vers B_1, qui est en communication avec le pôle zinc, et la valeur de cette déviation correspond à une différence de potentiel des deux disques précisément égale à celle qui a été observée précédemment au simple contact du zinc et du cuivre. On doit remarquer que, tandis que A est, dans la *fig.* 24, attiré vers le demi-disque de cuivre, il est attiré dans la *fig.* 25 vers le demi-disque en communication avec le pôle *zinc*. D'après la première expérience, nous savons que la soudure m a rendu positif le zinc plongé dans l'eau et négatif le cuivre soudé en m, ainsi que le demi-disque B_1. Or, on constate que le cuivre C et le demi-disque B sont positifs par rapport à B_1 exactement au même degré que Z doit l'être; de ce fait on conclut que l'eau a simplement amené la plaque de cuivre et le demi-disque B au potentiel du zinc. L'expérience est délicate et n'établit pas que la différence des potentiels entre B et B_1 est *exactement* égale à celle produite par le simple contact métallique du zinc et du cuivre; il y a une petite différence due au liquide, et des liquides différents ont certainement pour effet d'augmenter ou de diminuer ce léger écart.

Une autre expérience, non publiée jusqu'à présent, confirme d'une manière plus saisissante encore la théorie de Volta. Lorsque les deux demi-disques de cuivre et de zinc (*fig.* 24) sont reliés par un fil métallique, il est impossible de trouver une position de A pour laquelle le renversement de son potentiel ne détermine pas une déviation, et si A est placé symétriquement par rapport à ces demi-disques, le renversement du potentiel de A donne toujours des déviations égales et de sens contraire. Supposons que, cette posi-

tion symétrique ayant été trouvée, on réunisse le zinc et le cuivre par un filet d'eau et non plus par un fil métallique ; l'aiguille A demeure immobile dans cette position de symétrie, qu'elle soit portée à un potentiel bas ou élevé, positif ou négatif. Les deux demi-disques de métaux différents se comportent comme s'ils étaient deux demi-disques d'un seul et même métal en communication métallique. Cette expérience, qui a été faite avec soin par sir William Thomson, semble être absolument concluante. La surface des métaux doit être polie et nette ; l'expérience ne réussit pas s'ils sont ternis. La présence d'oxydes sur les surfaces métalliques produit des effets complexes.

L'opinion communément adoptée que le zinc et le cuivre d'un élément de pile diffèrent en potentiel d'une quantité égale à la la force électromotrice totale de l'élément (*voir* n° 23) est donc inexacte ; mais cette idée fausse n'a conduit dans la pratique à aucune erreur, parce que le cuivre, le laiton, ou en général les fils reliés aux deux métaux de l'élément diffèrent réellement en potentiel de la quantité attribuée à tort aux plaques immergées.

23. Cette propriété de produire une différence de potentiel peut être attribuée à une force particulière, à laquelle on donne le nom de *force électromotrice*. Quand on dit, par exemple, que le zinc et l'eau engendrent une force électromotrice déterminée, on veut dire qu'une certaine différence de potentiel bien définie s'établit par leur contact. Une série d'éléments de pile (Chap. I, n° 16) produit une force électromotrice déterminée entre les métaux extrêmes plongés dans la dissolution, et cette force dépend, suivant la loi constatée plus haut, des différences successives de potentiel engendrées à chaque surface de séparation de deux substances consécutives. La force électromotrice d'un élément, ou la différence de potentiel qui existe entre les métaux polaires ou *électrodes* de cet élément, est constante pour les mêmes métaux et la même dissolution. Les mots *force électromotrice* et *différence de potentiel* sont employés fréquemment l'un pour l'autre ; mais ils ne sont pas absolument synonymes. On devra se rappeler que la force électromotrice n'est pas une force mécanique tendant à mettre une masse pesante en mouvement ; c'est le nom donné à la force hypothétique

qui produit ou tend à produire un transport d'électricité. Partout où une différence de potentiel est constatée, il y a nécessairement une force électromotrice; mais on verra (Chap. III, n° 22) que dans certains cas l'électricité est mise en mouvement d'un point à un autre sans qu'il y ait entre eux cette différence d'état que nous avons définie sous le nom de *différence de potentiel*. Le mot *force électromotrice* a donc une signification plus générale et comprend parmi ses acceptions celle que présente le mot *différence de potentiel*.

24. La force électromotrice développée entre deux métaux différents est modifiée par tous les changements qui surviennent dans la température de ces métaux; mais la relation qui existe entre les variations de la température et celles de la force électromotrice n'a pas encore été complètement étudiée. Deux parties d'un seul et même corps qui se trouvent à des températures différentes ont probablement toujours des potentiels différents. Ce fait n'a été vérifié que pour quelques substances, par exemple, pour les cristaux de tourmaline.

25. La force électromotrice peut encore être produite par l'électricité en mouvement et par le magnétisme à l'aide de procédés qu'il nous est impossible d'exposer actuellement et avant d'avoir décrit les phénomènes élémentaires de l'électricité dynamique et du magnétisme; mais on peut dire d'une manière générale que toutes les causes, capables de modifier la distribution de l'électricité, ont le pouvoir d'engendrer une force électromotrice ou une différence de potentiel. Toute source d'électricité doit être capable de produire une différence de potentiel; car aucune charge électrique, quelle qu'elle soit, ne peut devenir sensible s'il n'y a pas une différence de potentiel entre le corps chargé d'une part et la terre ou les conducteurs voisins d'autre part. Le frottement entre deux corps isolants développe une force électromotrice intense et produit une charge qui peut devenir considérable sur un conducteur donné, même de petite dimension; au contraire, un élément de pile ou le contact de deux corps conducteurs développe une force électromotrice très faible et ne produisant qu'une très petite charge sur un conducteur

de petite dimension. D'un autre côté, si ce conducteur est de dimension considérable, l'élément de pile le charge presque instantanément sur toute sa surface au potentiel maximum qu'il peut produire, en même temps que la réaction chimique développe une énorme quantité d'électricité; au contraire la quantité développée par le frottement au contact des corps isolants est tellement petite que, si elle a la faculté de se répandre sur un conducteur de grande dimension, le potentiel de celui-ci sera très peu augmenté. Par exemple, si l'on relie une boule de cuivre de quelques centimètres de diamètre au conducteur d'une machine électrique à frottement, quelques tours de la machine élèvent le potentiel de cette boule à un degré tel, qu'il suffit de l'approcher du bouton de l'électroscope pour déterminer la divergence des feuilles d'or. Touchez la même boule avec l'une des électrodes d'un élément de pile, l'autre électrode étant en communication avec le sol; la boule de cuivre reçoit sans doute une charge, mais cette charge est si faible et son potentiel si bas qu'il faudrait, pour en constater l'existence, des instruments peut-être mille fois plus sensibles que ceux que nous avons décrits jusqu'à présent. Supposons qu'on relie l'élément de pile avec un condensateur ou une bouteille de Leyde à très large surface; celle-ci recevra une charge si grande que, bien que son potentiel ne puisse être manifesté par les électroscopes déjà décrits, la quantité d'électricité accumulée sera capable d'échauffer notablement un fil en s'écoulant dans la terre, et de produire beaucoup d'autres effets qu'on obtiendrait très difficilement avec la même bouteille de Leyde chargée par le conducteur d'une machine électrique à frottement. D'autre part, ce conducteur fournit à une bouteille de Leyde, *de faible surface,* une charge beaucoup plus grande que celle qui pourrait être accumulée dans la même bouteille par une pile de 1000 éléments disposés en série comme au n° 16.

26. Une différence de potentiel ou une force électromotrice doit être estimée au moyen de quelque unité adaptée à la mesure du travail. Toute unité de travail doit être représentée par l'effet d'une force surmontant une résistance et la déplaçant sur une certaine étendue; ou, ce qui est la même chose, elle peut se représenter à la fois par la résistance surmontée et le déplacement du

point d'application. En d'autres termes l'unité de force, appliquée sur l'étendue de l'unité de longueur, fournit l'unité de travail.

L'unité de travail communément employée est le kilogrammètre; c'est le travail dépensé pour soulever un poids de 1^{kg} d'une hauteur égale à 1^{m}; mais l'unité de travail qu'on a désignée sous le nom d'*unité absolue* est celle qui conduit à la plus grande simplicité possible dans les calculs électriques. Cette unité représente le travail de l'unité absolue de force surmontant une résistance sur une longueur égale à l'unité, c'est-à-dire à 1 centimètre (Chap. I, nº 17). L'unité absolue de travail (dans le système centimètre-gramme-seconde) est une fraction de kilogrammètre égale à $\frac{1}{100000 g}$, g étant en centimètres la vitesse acquise au bout d'une seconde par un corps qui tombe dans le vide. Si l'on prend, pour la valeur de g, 981 centimètres, l'unité absolue du travail est égale à $\frac{1}{98100000}$ de kilogrammètre. L'unité de différence de potentiel ou de force électromotrice en mesure électrostatique est la différence de potentiel ou la force électromotrice qui existe entre deux points quand l'unité de quantité d'électricité passant de l'un à l'autre produit l'unité de travail. L'unité de quantité a été définie au Chapitre I (nº 17).

On mesure quelquefois, dans la pratique, la différence de potentiel entre deux points en déterminant le travail effectué par des quantités définies d'électricité qui passent d'un point à l'autre; on peut déterminer, par exemple, la somme totale de chaleur produite dans un fil par une quantité donnée d'électricité, qui s'écoule entre deux points maintenus à une différence de potentiel constante. Connaissant la chaleur développée, on calculera le travail et par suite la différence de potentiel, puisque la quantité est connue. C'est ainsi que pour mesurer la différence de niveau entre deux points on pourrait laisser tomber un poids déterminé de l'un de ces points à l'autre, mesurer la chaleur totale produite par le choc qui ramènerait ce poids à l'état de repos, déduire de la chaleur la valeur du travail effectué, et conclure enfin de ce travail et du poids connu la différence du niveau ou le potentiel de gravité. Il existe heureusement des méthodes plus directes, et s'il leur fallait recourir à la précédente, les ingénieurs chargés d'un nivellement éprouveraient de singulières difficultés.

La différence des potentiels électriques est plus généralement déterminée indirectement au moyen des lois qui lient le potentiel aux autres grandeurs électriques. Ainsi on sait que les quantités d'électricité qui chargent les surfaces opposées de deux conducteurs mis en présence l'un de l'autre sont simplement proportionnelles à la différence des potentiels de ces conducteurs, pourvu que la distance de ceux-ci et le diélectrique qui les sépare demeurent constants. Les électromètres nous permettent de comparer ces quantités d'électricité (n° 15) et, par suite, de comparer les différences de potentiel. La mesure des courants et celle des résistances, qui seront l'objet des Chapitres suivants, fournissent d'autres moyens de comparer les différences de potentiel.

CHAPITRE III.

COURANT.

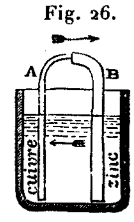
1. L'électricité, comme on l'a déjà dit plusieurs fois, peut modifier la distribution de sa charge sur un conducteur donné, ou se mouvoir d'un conducteur à un autre à travers un fil de jonction. On peut donc, avec juste raison, parler du *courant* électrique au moyen duquel s'effectue la nouvelle distribution. Tout corps, dans lequel se meut l'électricité, acquiert, pendant toute la durée du mouvement, des propriétés très remarquables; pour éviter de longues périphrases, ces propriétés qui nous semblent réellement appartenir aux corps traversés par le courant, seront considérées, dans l'exposé des faits, comme les propriétés ou les attributs du courant électrique lui-même. Quelques-unes des propriétés du courant électrique s'observent plus commodément dans des conducteurs longs et de section uniforme, tels que des fils, à travers lesquels le flux électrique a lieu dans une seule direction. L'étude des courants dans les fils nous occupera principalement dès le début; mais on saura que des propriétés identiques appartiennent aux courants qui se meuvent d'une manière quelconque dans des conducteurs de forme quelconque.

Le sens d'un courant est la direction de la ligne qui va du point dont le potentiel est le plus élevé au point dont le potentiel est le plus bas; en d'autres termes, c'est le sens dans lequel s'écoule l'électricité positive. Ainsi, pour revenir à notre précédente définition des électricités positive et négative, supposons qu'on électrise,

d'une part, un conducteur A en le touchant avec un bâton de verre frotté contre la résine, et, d'autre part, un second conducteur B en le touchant avec la résine qui a servi à frotter le verre. Si l'on joint A et B par un fil, un courant d'électricité positive ou vitrée passera de A en B jusqu'à ce que les deux corps soient amenés au même potentiel. En employant deux conducteurs A et B de dimensions considérables ou deux bouteilles de Leyde de grande capacité, et en les électrisant à un potentiel élevé avec une machine électrique à frottement, de large surface, on peut accumuler une charge considérable sur A et sur B et, par suite, déterminer un écoulement d'électricité abondant de A en B par la réunion de ces conducteurs.

2. Un courant électrique ainsi obtenu est éphémère, et même il ne demeure pas constant pendant sa courte durée, parce que la différence de potentiel qui le produit va sans cesse en diminuant; en réalité, si nous n'avions pas d'autre procédé pour engendrer un courant électrique, nous serions sans doute encore dans l'ignorance des propriétés des courants. Lorsque des plaques de zinc et de cuivre sont plongées dans l'eau sans qu'elles se touchent, et réunies l'une à l'autre en dehors du liquide par un fil métallique, un courant circule du cuivre au zinc à travers le fil, et du zinc au cuivre à travers l'eau. D'après la théorie exposée dans le Chapitre précédent, le zinc au contact du cuivre devient positif, et le cuivre négatif; les deux électricités sont séparées à la jonction métallique du zinc et du cuivre; mais, comme rien n'empêche qu'elles ne se recombinent à travers le liquide, il se produit un courant dans le sens indiqué par les flèches (*fig.* 26). On s'assure de l'existence de ce courant en constatant que, si A et B sont réunis par un long fil de cuivre, ce fil acquiert les mêmes propriétés que s'il réunissait deux conducteurs de grande dimension chargés d'électricités de signes contraires. Ces propriétés sont exposées au n° 6 et dans le reste de ce Chapitre.

Fig. 26.



3. Le transport d'une charge électrique de A en B entraîne la production d'un certain travail ou d'une de ses formes équivalentes, et

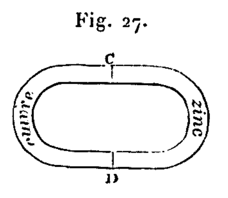
la production d'un travail quelconque exige une source de puissance ou, en d'autres termes, une dépense d'énergie. Le simple contact de deux substances hétérogènes ne peut être la source d'une telle puissance. Mais on constate que sur le passage du courant, l'eau est décomposée en même temps qu'il se forme de l'oxyde de zinc. C'est cette réaction chimique qui est une véritable source de puissance électrique. L'oxygène abandonne l'hydrogène de l'eau et s'unit au zinc pour lequel il a une affinité plus grande. Le zinc est consumé dans cette opération, comme le charbon est consumé lorsqu'il brûle en se combinant avec l'oxygène de l'air. Essayons de donner une idée exacte de la source de puissance électrique qui intervient; l'énergie intrinsèque d'un poids donné de zinc et d'eau est plus grande que celle du gaz hydrogène et de l'oxyde de zinc produits par la réaction; la différence est égale au travail effectué par le courant électrique qui s'est développé. Ce travail est donc proportionnel à la quantité de zinc consumé. Or la force électromotrice est ici constante, puisqu'elle ne dépend que des substances en contact dans l'élément; et, comme le travail produit dans le transport d'une charge électrique sous l'influence d'une force électromotrice constante est dans un rapport défini avec la charge transportée, on conclut que la quantité d'électricité, fournie par l'élément de pile, est proportionnelle au poids de zinc brûlé. L'effet qu'on vient d'analyser dans l'élément de forme simple se manifeste toutes les fois qu'on réunit entre eux deux corps solides et bons conducteurs A et B, en les plongeant d'autre part dans un liquide composé de plusieurs substances dont l'une a plus d'affinité chimique pour A que pour B, ou inversement. Si nous considérons séparément le corps liquide, il n'est pas douteux qu'il se produit de l'électricité positive sur la surface de l'un des conducteurs baignée par le liquide; mais cette électricité disparaît, à mesure qu'elle se forme, pour venir neutraliser l'électricité négative produite à la surface de contact de l'autre conducteur et du liquide.

4. Il y a eu un long et vif débat entre les électriciens qui soutenaient que l'électricité développée dans ces conditions est due au contact, et ceux qui l'attribuaient uniquement à l'action chimique; comme dans un grand nombre d'autres disputes célèbres, tout se

réduit ici à une simple querelle de mots [1]. Le contact de deux substances hétérogènes et l'action chimique sont l'un et l'autre nécessaires à la production du courant; potentiel et courant sont assujettis à des règles précises qui dépendent essentiellement de la nature des substances en contact et de l'intensité de l'action chimique. Peut-être est-il rigoureusement vrai de dire qu'une différence de potentiel est produite par le contact, et que le courant, maintenu par cette différence, est engendré et alimenté par l'action chimique. Comme on le verra plus loin, la valeur de la différence des potentiels peut se déduire exactement de la mesure de l'action chimique; mais alors cette action chimique dépend probablement des propriétés mêmes qui déterminent la production d'une différence de potentiel par le simple contact. Dans le cas où aucune action chimique connue n'intervient, comme il arrive pour le cuivre et le zinc amenés en contact, il y a production d'une différence de potentiel, et puisque cet état entraîne une distribution nouvelle d'électricité, on doit conclure qu'une dépense faible mais définie d'énergie a nécessairement eu lieu. Aujourd'hui on ne peut dire encore à quelle source est empruntée cette puissance électrique.

5. La loi énoncée au Chapitre II (n° 21), relativement au classement des métaux d'après la force électromotrice ou la différence de potentiel développée au contact, ne nous laisse aucun espoir d'obtenir jamais un courant permanent dans un circuit quelconque formé de différents métaux à la même température. La force électromotrice à la soudure C (*fig.* 27) est nécessairement égale et opposée à celle qui existe à la soudure D; en d'autres termes, la force électromotrice en C (que l'on écrit F.E.M., d'une façon abrégée), tend à produire un courant circulant dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre, tandis que la F.E.M. en D tend à produire un courant dans la

Fig. 27.



(1) Les adversaires de la théorie du contact niaient des faits que l'on sait maintenant être vrais, ou bien ils en donnaient une explication erronée. Les premiers partisans de la théorie du contact ignoraient les lois de la Dynamique.

direction opposée. Comme les deux forces sont égales, aucun mouvement électrique ne s'opère ni dans un sens ni dans l'autre.

Si, au lieu de mettre le zinc et le cuivre en contact au point D, on les plonge dans l'eau, la force électromotrice développée à la soudure C demeure ce qu'elle était précédemment; d'autres forces électromotrices, dues sans doute à l'électrolyse de l'eau, se manifestent sur les surfaces de contact du liquide et des métaux; mais ces forces ne contre-balancent pas celle due au seul contact des métaux, et par suite le courant peut circuler dans le sens indiqué au n° 2. Le mode de distribution des potentiels dans l'élément de pile, sur les plaques et sur les fils qui réunissent les plaques, ne pourra être expliqué qu'après les développements donnés dans ce Chapitre et le suivant.

Ce qu'il nous importe principalement de retenir, c'est que les éléments de pile peuvent être groupés de manière à produire un courant continu et capable de transporter de grandes quantités d'électricité. L'*intensité* d'un courant est simplement proportionnelle à la quantité d'électricité transportée dans un temps donné.

6. Les propriétés des courants électriques sont très importantes. Deux fils parallèles traversés par des courants électriques de même sens s'attirent mutuellement; on exprime plus simplement ce fait en disant que des courants parallèles et de même sens s'attirent mutuellement. Les courants parallèles de sens contraire se repoussent.

Lorsque les fils traversés par les courants sont rectilignes mais non parallèles, ils s'attirent si les courants vont en se rapprochant ou en s'éloignant tous deux du sommet de l'angle formé par les fils.

Les courants se repoussent quand l'un d'eux se rapproche du sommet de l'angle, tandis que l'autre s'en éloigne.

7. Formons avec un fil un rectangle EFGH, et suspendons-le au-dessus du fil rectiligne AB (*fig.* 28); dans chacun de ces fils circule un courant dont le sens est indiqué par les flèches. En supposant que le rectangle soit mobile autour d'un axe vertical XX', on constate par l'expérience que EG est attiré vers A; que FH est

attiré au contraire vers B; que par suite ces deux côtés du rectangle tendent à le faire tourner dans le même sens autour de son axe; que la partie de HG située dans la figure derrière AB est attirée vers B et repoussée de A; qu'au contraire la partie de HG située en avant de AB est repoussée de B et attirée vers A.

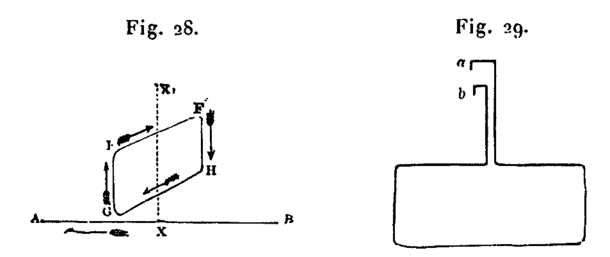


Fig. 28. Fig. 29.

Toutes ces forces agissent ainsi dans la même direction et tendent à amener le rectangle EFGH dans un plan parallèle à AB. Les forces développées par le courant fixe sur EF agissent en sens contraire; mais comme EF est plus éloigné de AB que le reste de la figure, ces forces sont plus faibles que les autres qui restent prédominantes. Ces attractions et répulsions se vérifient aisément au moyen d'un rectangle formé d'un fil de cuivre (*fig.* 29) et monté sur deux pivots *a* et *b*, qui s'appuient sur le fond de deux coupes remplies de mercure et reliées par de gros fils à un élément de Grove.

8. Si l'on imagine (*fig.* 30) un rectangle ABCD dans l'intérieur d'un autre rectangle EFGH, la résultante des actions qu'on vient d'analyser aura une intensité plus grande; les deux rectangles tendront à se placer d'eux-mêmes dans des plans parallèles et, de plus, à s'orienter de telle sorte que le courant suive la même direction dans les deux circuits rectangulaires. Il est évident que la vérité de cette proposition n'est pas limitée aux systèmes rectangulaires; en général, deux circuits fermés quelconques dans lesquels circulent des courants, tendent à prendre d'eux-mêmes cette

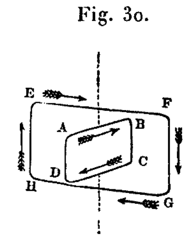
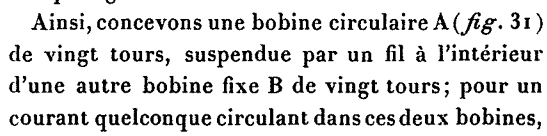


Fig. 30.

orientation relative. Si les deux circuits sont dans un même plan, on peut leur assigner une forme et une position telles que l'un d'eux étant fixe n'attire pas l'autre circuit mobile, mais simplement le dirige ; ce cas sera réalisé, par exemple, avec deux courants circulaires concentriques. Si les deux circuits ne sont pas dans le même plan, ils s'attirent mutuellement, même après qu'ils se sont orientés dans des plans parallèles ; cette attraction se change en répulsion, lorsque les circuits sont amenés et maintenus dans une position telle que les deux courants circulent en sens contraire. Quand les deux circuits sont dans le même plan mais non concentriques, il y a généralement une force résultante qui tend à produire un déplacement relatif des deux circuits dans leur plan commun ; cette force provient de l'inégale distance qui sépare les éléments correspondants des deux fils. Ces attractions et répulsions observées entre les courants sont tout à fait distinctes des attractions et répulsions produites entre les masses électriques au repos. Elles ont été découvertes par Ampère.

9. Les actions réciproques des courants sur les courants sont évidemment accrues et multipliées si l'on emploie, au lieu d'un simple fil, une bobine de fils dont les spires sont toutes parcourues par le même courant. Par exemple, un circuit formé de vingt tours de fil enroulé sur une bobine sera sollicité par une force vingt fois égale à celle qui agirait sur un seul tour, en supposant que les deux circuits soient traversés par le même courant ; si le second circuit est aussi formé de vingt tours de fils, tous parcourus par un courant de même intensité que le courant primitif, les forces réagissantes seront encore devenues vingt fois plus grandes.

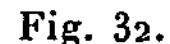
Fig. 31.

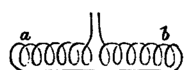


Ainsi, concevons une bobine circulaire A (*fig.* 31) de vingt tours, suspendue par un fil à l'intérieur d'une autre bobine fixe B de vingt tours ; pour un courant quelconque circulant dans ces deux bobines, la première A sera sollicitée par une force directrice 400 fois égale à celle qui solliciterait un circuit d'un seul tour suspendu à l'intérieur d'un second circuit formé lui-même d'un tour unique. C'est sur ce principe que repose la construction des instruments appelés

électrodynamomètres, et destinés à manifester la présence des courants électriques. Une bobine A, formée quelquefois de plusieurs milliers de tours, est suspendue à l'intérieur d'une bobine B composée elle-même d'un nombre considérable de tours; chaque spire est isolée de ses voisines au moyen de la soie qui recouvre le fil. Quand aucun courant ne circule, les plans des deux bobines sont maintenus à angle droit l'un sur l'autre, au moyen d'une force directrice très faible, telle que la torsion d'un fil. Si l'on fait passer un courant dans ces deux bobines, l'écart angulaire de leurs plans diminue et la bobine A prend une orientation telle, que les courants parcourent les deux circuits dans le même sens. L'instrument est quelquefois utilisé d'une autre façon; on peut faire circuler dans A un courant d'intensité connue et dans la bobine B un autre courant que l'on veut étudier. Le sens du courant inconnu est indiqué par le sens de la déviation de A; sa grandeur ou son intensité par l'angle de déviation de cette bobine.

10. D'autres dispositions analogues se présentent d'elles-mêmes à l'esprit du lecteur. Supposons que la bobine centrale A, au lieu de ressembler à un anneau, ait la forme d'un cylindre de petit diamètre et de grande longueur (*fig.* 32); si l'enroulement du fil


Fig. 32.



sur le cylindre est tel, que le courant traverse dans le même sens toute l'étendue des spires, la déviation du cylindre, à l'intérieur de la bobine B, sera beaucoup plus apparente; les deux extrémités *a* et *b* peuvent être assimilées à deux pôles qui ont une tendance à sa placer d'eux-mêmes sur une ligne perpendiculaire au plan de la bobine directrice. Introduisons ce cylindre dans l'intérieur d'un second ayant ses spires semblables et parallèles à celles du premier; celui-ci sera dans un état d'équilibre stable ou instable, suivant que les courants circuleront dans le même sens ou en sens contraire sur les deux cylindres.

Si le pôle *a* est introduit dans l'intérieur de la bobine AB, comme

l'indique la *fig.* 33, la bobine *ab* est entraînée et pour ainsi dire aspirée par suite de l'attraction des deux systèmes de courants l'un sur l'autre. Au contraire, si l'on change le sens du courant de la bobine *ab*, le pôle *b* est opposé au pôle semblable B, comme l'indique la *fig.* 34, et la bobine intérieure est chassée en dehors de

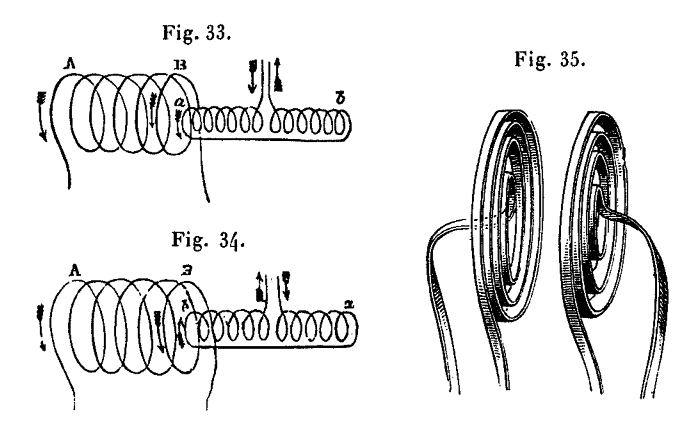


Fig. 33.

Fig. 34.

Fig. 35.

la spirale fixe et repoussée loin du pôle B. Ces actions se manifestent quel que soit le diamètre des spires ou des cylindres. Concevons encore deux bobines plates en forme de spirale (*fig.* 35), placées en face l'une de l'autre; si les courants sont de même sens, elles s'attirent; s'ils sont de sens contraires, elles se repoussent mutuellement.

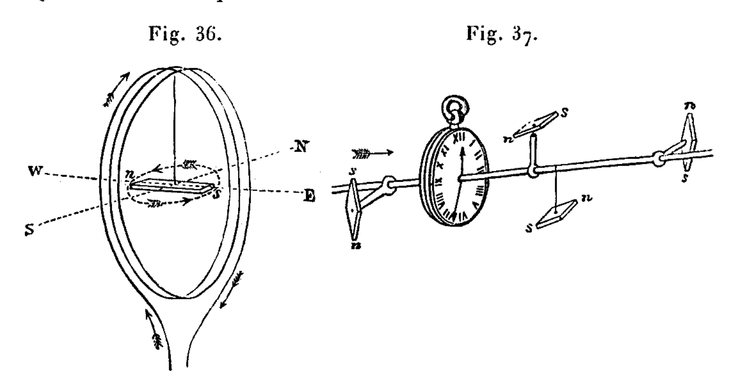
On peut se servir de l'un quelconque de ces systèmes de bobines pour constater l'existence, la direction et l'intensité d'un courant dans un fil. En prenant une bobine composée d'un grand nombre de tours de fil de cuivre fin et isolé avec de la soie, et en la suspendant de manière que dans sa rotation elle ne rencontre qu'une faible résistance de frottement ou de torsion, on construira facilement un appareil qui permettra de vérifier tous les phénomènes décrits aux nos 9 et 10. La longue bobine cylindrique, que l'on vient d'étudier, est appelée quelquefois un *solénoïde*.

11. On constate que les aimants sont influencés par les courants presque exactement de la même manière que les solénoïdes. En pré-

sence d'un courant, un aimant, libre de se mouvoir, est dirigé par une force qui tend à le mettre en croix avec le courant. Ce fait a été observé pour la première fois par Œrsted. Dans un aimant librement suspendu, l'extrémité qui pointe vers le Sud est assimilable à l'un des pôles du solénoïde, à celui qui présente le courant marchant dans le sens des aiguilles d'une montre dont le fond s'appuierait contre le pôle lui-même, le cadran étant tourné vers l'observateur. Autrement encore, si l'on compare le solénoïde à un tire-bouchon qui se manœuvre de gauche à droite et qui reçoit le courant par sa pointe, celle-ci et l'extrémité de l'aimant qui regarde le Sud se comportent de la même manière. Le solénoïde et l'aimant jouissent de plusieurs propriétés communes. Le solénoïde peut être dirigé par un simple courant rectiligne; il en est ainsi de l'aimant; de même qu'on augmente la force directrice exercée sur le solénoïde en l'enveloppant avec la bobine directrice, en rapprochant les circuits et en augmentant l'intensité du courant qui passe dans cette bobine, de même on augmente considérablement la force directrice ou le couple directeur qui agit sur un aimant en faisant circuler le courant un grand nombre de fois autour de l'aimant, en rapprochant la bobine de l'aimant et en se servant d'un courant énergique. Cette propriété de l'aimant permet de construire des instruments appelés *galvanoscopes* et *galvanomètres,* au moyen desquels on peut déceler et mesurer les courants sans recourir à deux bobines de fil isolé. Dans les galvanoscopes, un aimant est suspendu à l'intérieur d'une bobine directrice orientée de façon que chaque tour de fil soit parallèle au plan du méridien magnétique. L'aimant a ses pôles dans la direction nord-sud, c'est-à-dire dans le plan de la bobine, tant qu'aucun courant ne circule à travers celle-ci; mais dès qu'on fait passer un courant, l'aimant est dévié plus ou moins vers la droite ou vers la gauche, jusqu'à ce que le couple dû à l'action directrice du courant soit équilibré par le couple dû à l'action directrice de la terre. Lorsque le courant circule du Sud au Nord sur la partie supérieure de la bobine directrice (*fig.* 36), l'extrémité de l'aimant qui pointait vers le Sud et qu'on désignera désormais sous le nom de *pôle sud* de l'aimant se tourne vers l'Est.

Le sens dans lequel un aimant tend à tourner sous l'influence d'un courant peut encore être défini de la manière suivante. Imaginez un observateur couché sur le courant dans une position telle que le courant passe des pieds à la tête, la face de l'observateur étant d'ailleurs tournée vers l'aimant; alors le pôle de l'aimant, qui, soustrait à toute action étrangère, pointerait naturellement vers le Sud, est dévié vers la droite de l'observateur sous l'influence du courant. Ou bien encore, supposez qu'un courant circule dans une hélice en fil de cuivre et que l'aimant occupe sa position naturelle dans l'intérieur des circonvolutions du fil; si l'on tourne cette hélice à la façon d'une vis et dans le sens même de la rotation du courant sur chaque spire, elle s'avance du Sud au Nord parallèlement à l'aiguille aimantée qui forme l'axe de l'hélice.

Fig. 36. Fig. 37.

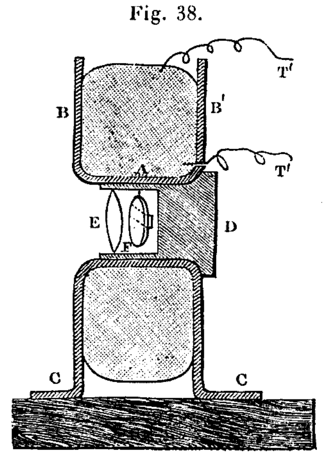


Voici encore un autre moyen de reconnaître le sens dans lequel un courant fait dévier un aimant. Imaginez une montre traversée par le fil conducteur d'un courant, de manière que le courant entre par le dos de la montre et sorte par le pivot central du cadran; le pôle sud de l'aimant est alors entraîné par le courant dans le sens du mouvement des aiguilles (*fig.* 37).

12. Le galvanoscope et le galvanomètre sont des instruments d'une importance si grande qu'il conviendra de les décrire en détail au Chapitre X; mais comme nous parlerons désormais à chaque instant des courants électriques et de leurs propriétés, il est à propos d'indiquer ici comment on peut construire aisément un gal-

vanomètre qui permette de déceler l'existence d'un courant et de comparer les intensités relatives de divers courants. Enroulez un fil de cuivre recouvert de soie sur une bobine cylindrique et creuse en aiton A (*fig.* 38), munie de larges rebords BB', qui peuvent être armés de pattes C destinées à fixer la bobine sur un socle de bois ou d'ébonite. Dans l'intérieur de la bobine A, ajustez une petite cheville de laiton D portant à l'une de ses extrémités une chambre, fermée par une lentille E dont la distance focale est d'environ $0^{m},120$. Enfin, dans cette petite chambre, suspendez un miroir et un aimant à un même fil de soie, tiré par exemple d'un ruban de soie ordinaire. Ce fil doit être ténu au point d'être à peine visible; quant au miroir, il sera formé d'un verre à microscope aussi mince que possible et de surface rigoureusement plane. L'aimant peut être fixé sur le dos du miroir par une goutte de laque dissoute dans l'alcool; on prend des précautions pour que la surface du miroir ne soit pas déformée par l'aimant. Le fil de soie doit aussi être attaché au miroir avec un vernis de laque; cela fait, on l'introduit par une petite ouverture ménagée dans la chambre, à l'aide d'une aiguille de cire à cacheter ou de gomme laque, et on l'assujettit contre la paroi supérieure avec un peu de mastic ou de tout autre vernis. La cheville D peut alors être introduite dans la bobine A ou en être retirée à volonté.

Fig. 38.

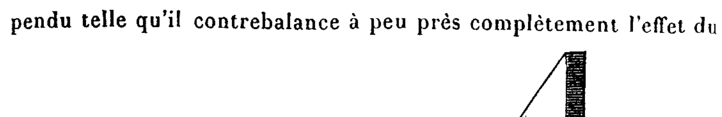


S'il s'agit d'observer des courants qui traversent des circuits d'une grande longueur ou formés de corps mauvais conducteurs, il faut que le fil de cuivre de la bobine soit fin, par exemple de $0^{mm},115$ de diamètre, et qu'il fasse plusieurs milliers de tours. Le diamètre de la chambre ménagée dans la cheville peut être de $0^{m},015$, la distance de B à B' de $0^{m},03$, et le diamètre extérieur des rebords B et B' de $0^{m},06$ ou $0^{m},07$. Avec ces dimensions, on peut placer sur la bobine plusieurs milliers de tours de fil fin.

S'il s'agit d'observer des courants qui traversent des circuits courts ou formés de corps bons conducteurs, on remplira l'espace compris entre les rebords B et B' avec deux ou trois douzaines de tours de gros fil de cuivre de $0^{mm},9$ ou même $1^{mm},65$. Il est commode de relier les deux extrémités de la bobine T' et T' à deux bornes en laiton (*fig.* 39), isolées avec soin sur des blocs en ébonite et pourvues de vis, qui permettent d'y fixer les extrémités d'autres fils. L'instrument est complété par une lampe à pétrole L, disposée derrière un écran qui présente une fente verticale M d'environ $0^{m},06$ de hauteur en face même de la bobine, et qui porte en outre une échelle horizontale de papier blanc N d'environ $0^{m},45$ de longueur.

Dans la position indiquée (*fig.* 39), la lumière de la lampe traverse la fente M et la lentille E, et tombe sur le miroir F qui la renvoie par réflexion sur l'échelle. Une image de la fente apparaît sur cette échelle. Lorsque la lumière tombe normalement sur le miroir, l'image se forme précisément au-dessus de la fente de l'écran; si un courant traverse la bobine, l'aimant est dévié vers la droite ou vers la gauche; l'image se déplace le long de l'échelle à droite ou à gauche, et l'angle que les rayons réfléchis forment avec les rayons incidents est le double de l'angle de déviation de l'aimant ou du miroir. Un très petit angle de déviation produit un déplacement considérable de l'image. Pour un appareil construit avec les dimensions indiquées plus haut, le déplacement horizontal de l'image est sensiblement proportionnel à l'intensité du courant. Si l'échelle est recourbée de façon à former une portion de surface cylindrique, dont l'axe coïncide avec l'axe de suspension du miroir, la tache de lumière réfléchie s'aperçoit plus distinctement sur toute l'étendue de l'échelle. L'instrument qu'on vient de décrire est le galvanomètre à miroir de sir William Thomson. Au moyen de cet appareil, on peut observer l'existence d'un courant et l'accroissement ou la diminution de son intensité. Il convient de disposer un barreau aimanté S dans le méridien magnétique, immédiatement au-dessus de la bobine ; en élevant ou en abaissant cet aimant, on peut augmenter ou affaiblir la force directrice de la terre. Si le pôle sud du barreau S est tourné vers le Sud, on parvient par tâtonnement à placer ce barreau à une distance de l'aimant sus-

pendu telle qu'il contrebalance à peu près complètement l'effet du



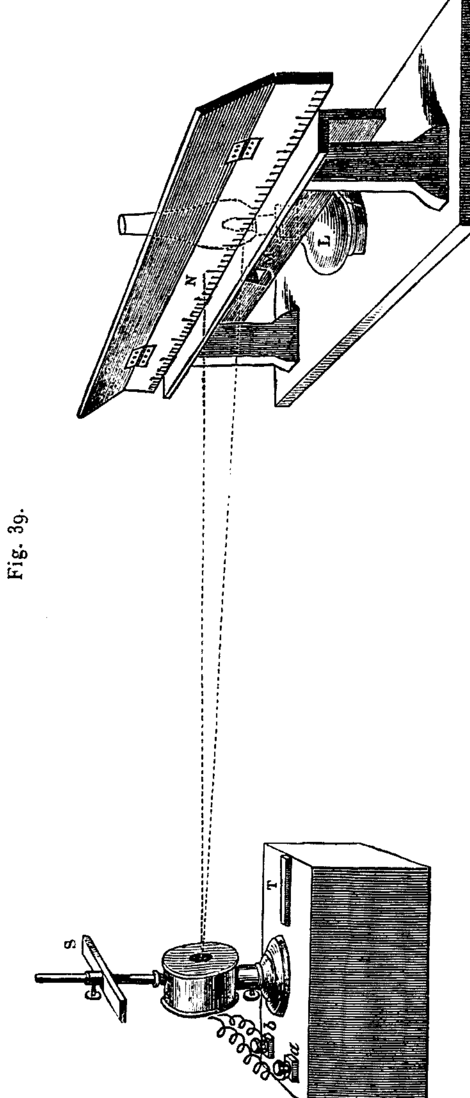
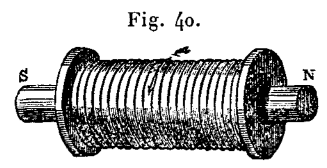


Fig. 39.

magnétisme terrestre. L'instrument est ainsi rendu très sensible, mais la tache lumineuse ne reste jamais absolument immobile sur l'échelle. On peut se servir d'un second aimant T placé perpendiculairement au méridien magnétique, pour mettre l'appareil au zéro quand aucun courant ne passe, c'est-à-dire pour ramener la tache lumineuse sur un repère tracé au milieu de l'échelle. La direction du méridien magnétique est celle que prend naturellement la ligne des pôles d'un barreau aimanté librement suspendu.

13. Non seulement un courant agit sur un barreau en fer ou en acier, qui est déjà aimanté; mais encore il transforme toute pièce de fer ou d'acier placée dans son voisinage en un aimant dont les pôles sont alignés dans la direction même que prendrait un aimant en liberté soumis à l'action du courant. L'aimantation est d'autant plus énergique que le barreau est plus rapproché du courant, que le courant est plus intense et qu'une plus grande étendue de son circuit agit dans le même sens sur le fer. Ainsi un barreau de fer placé dans l'intérieur d'une hélice ou d'une bobine (*fig.* 40) formée d'un grand nombre de spires est fortement aimanté par le courant : ses pôles nord et sud sont disposés comme le montre la *fig.* 40.

Fig. 40.



L'aimantation produite par le courant n'est que momentanée si le fer est doux ou recuit; dans le fer non recuit, des traces de magnétisme persistent longtemps après que le courant a cessé; et un barreau d'acier fortement trempé conserve d'une façon permanente une partie de l'aimantation qu'il a reçue. Pour produire cette aimantation, il y a eu travail accompli et par suite dépense d'énergie.

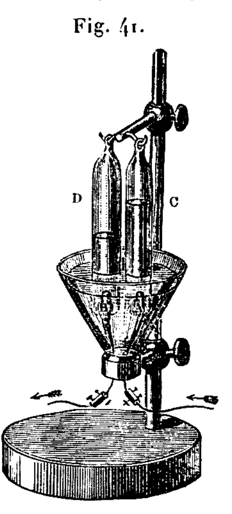
14. L'existence d'un courant dans un fil indique qu'il y a transport d'électricité sous l'action d'une force électromotrice, et, d'après la définition d'une force électromotrice, à ce transport d'électricité correspond un travail accompli sous une forme ou sous une autre.

Quand un courant circule dans un fil sans provoquer ni effet d'aimantation sur le fer, ni mouvement sensible d'une masse quel-

conque, l'énergie dépensée dans la production du courant est tout entière employée à échauffer le fil conducteur; la chaleur développée dans un fil de longueur donnée est précisément équivalente au travail qu'il faudrait effectuer à l'encontre de la répulsion statique (n° 1, Chap. II), si l'on transportait d'une extrémité du fil à l'autre la même quantité d'électricité accumulée sur un conducteur de très petite dimension; si une partie de l'énergie est employée à produire d'autres effets, tels que ceux décrits précédemment, la quantité de chaleur développée dans le fil est réduite en proportion des effets produits. L'élévation de température du fil dépend de la chaleur spécifique du métal dont il est formé.

15. Lorsque le courant traverse un composé liquide conducteur au lieu d'un simple fil métallique, le liquide est le plus souvent décomposé; un élément ou un groupe d'éléments se porte vers les points où le courant pénètre dans le liquide, et les autres éléments vers les points où le courant sort du liquide. Faraday a désigné sous le nom d'*anode* la surface métallique par laquelle le courant positif entre dans le liquide, et sous le nom de *catode* la surface métallique par laquelle il en sort. Le composé liquide que l'électricité réduit en ses éléments s'appelle *électrolyte*, l'acte de la décomposition *électrolyse*, et les produits de l'électrolyse *ions*. Supposons que deux tubes de verre C et D (*fig.* 41), remplis d'eau, soient renversés dans un vase plein d'eau au-dessus de deux fils de platine A et B qui traversent le fond du vase; si l'on relie A et B à une pile suffisamment énergique pour qu'un courant puisse franchir l'intervalle AB, l'eau est décomposée par électrolyse; on trouve de l'oxygène en C et de l'hydrogène en D dans les proportions nécessaires pour former de l'eau.

Fig. 41.



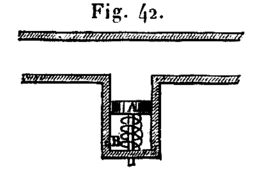
Il y a énergie absorbée dans la décomposition d'un composé quelconque, de même qu'inversement il y a énergie dégagée dans la

combinaison d'éléments qui ont de l'affinité chimique l'un pour l'autre. L'énergie absorbée dans la décomposition d'un électrolyte est perdue pour les effets mécaniques extérieurs ou la production de la chaleur dans le circuit.

16. Un courant peut traverser même les corps très mauvais conducteurs; mais, dans ce cas, le courant est faible, c'est-à-dire qu'il ne passe à travers ces corps qu'une quantité relativement faible d'électricité dans un temps donné et sous l'influence d'une force électromotrice donnée. En général, les corps qui conduisent mal l'électricité sont des corps composés; on peut prendre les résines comme types des corps mauvais conducteurs. De faibles courants peuvent aussi traverser des électrolytes sans produire à un degré sensible aucun effet d'électrolyse. Il est certain qu'un travail de nature particulière est accompli par le courant dans ces circonstances; mais on ignore jusqu'à présent par quelle action ce travail est représenté, ou, en d'autres termes, on ne sait pas si les corps mauvais conducteurs sont échauffés ou décomposés, ou si quelque autre forme équivalente de travail représente l'énergie dépensée.

17. Si un courant est employé à mettre un aimant en mouvement, par exemple, à repousser en dehors d'une hélice l'un des pôles d'un aimant qu'on y a préalablement introduit, ce courant éprouve une véritable résistance, et le flux électrique est entravé par suite de l'effort accompli. La simple présence d'un aimant, maintenu immobile, ne gêne pas la marche du courant; une certaine force statique, non effective, existe alors entre le courant et l'aimant, et tant qu'un déplacement de cet aimant n'est pas produit sous l'influence ni à l'encontre de cette force, il n'y a pas de travail effectué, et le courant circule comme si l'aimant n'existait pas. L'expérience suivante offre quelque analogie avec le fait dont nous parlons. Supposons qu'un courant d'eau soit établi dans un tuyau (*fig.* 42), pourvu latéralement d'un piston A, qu'un ressort B maintient en place. L'eau en s'écoulant à travers le tuyau presse sur le piston A et transmet une force en B par l'intermédiaire d'une petite tige atta-

Fig. 42.



chée au piston. Quand cette force équilibre exactement la réaction élastique du ressort, il n'y a aucun travail effectué ni par l'eau sur le piston, ni par le piston sur l'eau qui passe au-dessus de lui; le courant d'eau continue comme si le piston n'existait pas. Mais si le ressort vient à s'affaiblir ou à fléchir sous l'effort transmis, la pression latérale de l'eau surmonte une résistance en refoulant le piston d'une certaine quantité, et par suite effectue un travail, comme le courant électrique effectue un travail en mettant l'aimant en mouvement. En outre, le débit sera entravé ou diminué pendant le travail, c'est-à-dire pendant le refoulement du ressort. Lorsque le ressort ainsi refoulé sur lui-même a acquis une force élastique assez grande pour équilibrer la pression de l'eau dans le tuyau latéral, le mouvement de l'eau reprend son cours normal dans le tuyau principal; il cesse d'être influencé par la présence du ressort B. De même pour le courant électrique, le flux est entravé dans sa marche pendant la déviation de l'aimant, et ne reprend son écoulement normal que lorsque l'aimant revient au repos. Toutefois l'analogie est imparfaite; car la diminution dans le débit du courant d'eau est accompagnée d'un accroissement de capacité dû au refoulement du piston, tandis que la diminution dans l'intensité du courant électrique n'est accompagnée d'aucun accroissement de capacité électrique. L'eau est simplement dérivée vers le piston, tandis que l'électricité est réellement retardée. Cette diminution d'intensité du courant, correspondant à une production de travail, ne s'observe pas seulement pendant le mouvement communiqué à un aimant; elle se produit aussi lorsque le travail du courant consiste, soit à mettre en mouvement un ou plusieurs fils conducteurs de courants, comme dans l'électrodynamomètre, soit à aimanter un barreau de fer doux.

18. Si le piston A est maintenant repoussé vers le tuyau d'écoulement, il engendre un courant; le débit augmente, tandis qu'il diminue lorsque le piston est refoulé par la pression de l'eau. L'effet produit est inverse. Un travail est effectué par le piston quand il est repoussé par le ressort vers le tuyau, et ce travail est dépensé dans la production d'un courant additionnel ou d'un *extra-courant* d'eau.

De même, si l'aimant qui a été dévié est ramené de force vers sa

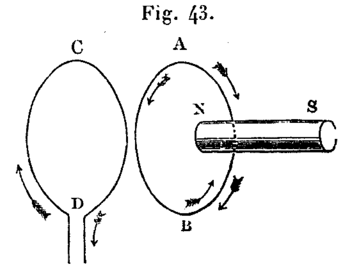
position primitive, il faut une dépense d'énergie extérieure pour vaincre la résistance que la répulsion électrique du courant oppose au déplacement de l'aimant; cette énergie produit un travail qui se retrouve dans un accroissement d'intensité du courant, accroissement précisément égal à la diminution observée lorsque le courant dépense une partie de sa propre énergie à repousser l'aimant. On dit alors qu'un courant est induit dans le fer par suite du déplacement relatif de l'aimant par rapport au fil; nous rencontrons ici un exemple d'énergie mise en réserve et restituée. Lorsque le courant a repoussé l'aimant, une partie de son énergie est dépensée à l'extérieur, en s'emmagasinant dans le système mobile; lorsque l'aimant retourne à sa position primitive, l'énergie emmagasinée est restituée au courant. Le courant liquide qu'on a vu tout à l'heure repousser un piston pressé par un ressort nous fournissait lui-même un exemple d'énergie mise en réserve et restituée. Un troisième exemple est offert par le pendule ordinaire. L'énergie du pendule se présente alternativement sous la forme d'énergie latente ou potentielle due à l'attraction de la pesanteur ou sous la forme d'énergie actuelle produite dans le mouvement. Pendant que la lentille du pendule s'élève, l'énergie actuelle se transforme graduellement en énergie potentielle et se trouve ainsi mise en réserve dans la masse oscillante; pendant que la lentille s'abaisse, l'énergie potentielle se convertit à son tour en énergie actuelle et est ainsi restituée par le mouvement. Pareillement, supposons qu'un courant dévie un aimant en le faisant osciller en avant et en arrière de sa position d'équilibre; l'énergie se présente alternativement sous la forme de répulsion électrique émanant du courant et d'énergie actuelle manifestée dans le mouvement; mais il y a une différence essentielle entre l'exemple tiré de la pesanteur et celui qui est fourni par l'électricité. L'intensité de la pesanteur n'est ni augmentée ni diminuée par le mouvement du pendule; au contraire, quand l'aimant oscille en obéissant à l'impulsion donnée par le courant, l'intensité du courant diminue; elle augmente lorsque l'aimant oscille en sens inverse de l'impulsion communiquée par le courant.

19. Le mouvement du piston (*fig.* 42) engendre un courant dans le tuyau, qu'il y ait ou non un courant déjà établi; si le piston recule

en s'éloignant du tuyau d'écoulement, il produit à l'orifice du corps de pompe une dérivation ou aspiration de l'eau; s'il est poussé vers l'orifice, il chasse l'eau au dehors du tuyau. De la même manière, le mouvement d'un aimant ou d'un fil traversé par un courant électrique dans le voisinage d'un conducteur, détermine la production d'un courant dans ce conducteur; toute variation dans l'intensité d'un courant ou dans le magnétisme d'un aimant près d'un conducteur est une cause de production de courants dans ce conducteur. *Le courant engendré dans le conducteur est de sens tel qu'il s'oppose au mouvement de l'aimant ou du courant, au changement de l'intensité du courant ou du magnétisme de l'aimant.*

Donnons ici quelques exemples de l'application de ce principe général énoncé pour la première fois par Lenz Soient AB un anneau métallique (*fig.* 43), CD un deuxième anneau à travers lequel un courant circule dans le sens des flèches, et NS un aimant. Tant que les positions relatives de CD, AB et NS ne varient pas; tant que le courant dans CD et le magnétisme dans NS restent constants, c'est-à-dire n'éprouvent ni augmentation ni diminution d'intensité, aucun courant ne circule dans l'anneau AB; mais une modification quelconque dans les conditions qui viennent d'être définies donne naissance à un courant dans AB. Ainsi :

Fig. 43.



1° Si l'anneau CD se rapproche de AB, un courant est induit sur AB dans le sens des flèches intérieures, et pendant cette action le courant dans CD diminue d'intensité.

2° Si l'anneau CD est éloigné de AB, un courant est induit sur AB dans le sens des flèches extérieures, et pendant l'induction le courant dans CD diminue d'intensité.

3° Si le pôle N de l'aimant NS est poussé au delà du plan de l'anneau ou simplement rapproché de cet anneau, un courant est induit sur AB dans le sens des flèches intérieures, et ce courant tend à s'opposer au mouvement imprimé à l'aimant.

4° Si le pôle N de l'aimant est retiré sur la droite en dehors ou à distance de l'anneau, un courant est induit sur AB dans le sens des flèches extérieures, et ce courant s'oppose à l'éloignement de l'aimant.

5° Si l'intensité magnétique du barreau est accrue, un courant est induit sur AB dans le sens des flèches intérieures, et ce courant fait obstacle à l'accroissement du magnétisme.

6° Si l'intensité magnétique du barreau est diminuée, un courant est induit sur AB dans le sens des flèches extérieures, et ce courant fait obstacle à la diminution du magnétisme.

Lorsqu'au lieu de simples anneaux on prend des bobines longues et épaisses, formées d'un grand nombre de tours de fil, ces phénomènes sont beaucoup plus marqués. Les effets d'induction entre les fils rectilignes et les aimants peuvent aisément se déduire du principe général énoncé précédemment. On a attribué à ces phénomènes la dénomination générale d'effets d'*induction,* quoiqu'ils n'aient aucune analogie avec ceux qui sont décrits au Chapitre I et déjà désignés sous le même nom. Pour distinguer ces deux ordres de phénomènes, il faut désigner l'induction étudiée au Chapitre I sous le nom d'*induction électrostatique,* et l'induction des courants sous le nom d'*induction électromagnétique.* En France et en Allemagne, l'induction électrostatique est connue sous le nom d'*influence.*

En raison de l'induction électromagnétique, les aimants et les fils sur lesquels circulent des courants électriques ne sont pas aussi libres dans leurs mouvements que les autres corps. Ils peuvent, à l'état de repos, être parfaitement en équilibre et sembler libres de se mouvoir dans toutes les directions; mais quand ils se déplacent, ils induisent des courants dans les conducteurs voisins, et ces courants sont de sens tels qu'ils produisent une force faisant obstacle au mouvement de l'aimant ou du fil. Du reste, il n'est pas possible de concevoir que de leur déplacement naisse une force qui favorise et soutienne leur mouvement propre; car alors on aurait trouvé le mouvement perpétuel, ou plutôt une source d'énergie perpétuellement croissante.

20. Un courant qui *commence* dans un circuit donné peut être

assimilé, au point de vue de ses effets sur les conducteurs voisins, à un courant permanent qui serait transporté instantanément de l'infini dans la position qu'il occupe actuellement. Or on sait qu'en amenant un courant CD (*fig.* 43), plus ou moins éloigné, dans le voisinage d'un fil qui fait partie d'un circuit distinct AB, on provoque dans AB un courant induit, de sens contraire au courant qui circule dans le fil parallèle CD. Le courant qui commence dans CD produit exactement le même effet : il induit un courant de sens contraire dans AB; de même un accroissement du courant CD produit un résultat semblable à celui qu'on obtiendrait en rapprochant CD de AB : il y a dans AB induction d'un courant de sens contraire à celui de CD. Ces courants induits cessent aussitôt que le courant inducteur CD cesse d'augmenter, ou qu'on cesse de rapprocher de AB le circuit CD traversé par un courant permanent.

La diminution du courant qui circule sur CD produit le même effet qu'on obtiendrait en éloignant CD de AB ; elle engendre dans AB un courant induit de même sens que le courant CD. La suppression totale du courant CD produit le même résultat qu'on obtiendrait en éloignant à une distance infinie le circuit CD et son courant, et par suite elle engendre sur AB un courant induit de même sens que celui qui existait sur CD. On peut donc ajouter aux six cas examinés au n° 19 les deux cas qui suivent :

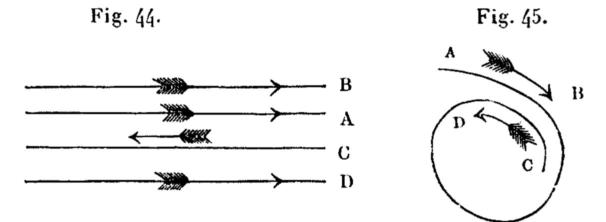
7° Si le courant CD finit ou décroît, un courant est induit sur AB dans le sens des flèches extérieures, et par suite la diminution du courant dans CD se trouve ralentie.

8° Si le courant CD commence ou croît, un courant est induit sur AB dans la direction des flèches intérieures, et par suite l'accroissement du courant dans CD se trouve ralenti.

21. L'induction accompagne infailliblement tout courant qui commence ou croît, finit ou décroît; car il y a toujours quelque part dans le voisinage d'un courant des conducteurs sur lesquels les courants induits peuvent circuler. Les courants induits diminuent pour l'instant l'intensité du courant inducteur, et l'on comprend clairement que les conducteurs voisins exercent une influence sur le temps employé par un courant, qui commence ou qui finit, pour atteindre un régime permanent ou pour disparaître entièrement du

circuit. Lorsqu'un circuit de faible résistance est, en totalité ou sur une grande partie de son étendue, très rapproché du courant inducteur et disposé de façon que les effets d'induction s'exercent sur tous les éléments dans le même sens, le courant induit sera très intense. En même temps, sa réaction sur le courant inducteur sera très énergique : on a réduit autant que possible le temps nécessaire à ce courant pour atteindre son état stable. Si au contraire le circuit sur lequel circule le courant induit est de grande résistance, ou très éloigné du courant inducteur, ou soumis à l'induction sur une petite partie de sa longueur seulement, ou disposé de façon que le courant développé tende à circuler dans des sens contraires sur les diverses parties du circuit, le courant induit sera de faible intensité et n'exercera aussi qu'une faible réaction sur le courant inducteur. Le courant inducteur produit une force électromotrice dans le circuit du courant induit, et l'on peut dire que le courant induit est dû à la force électromotrice induite. Lorsque le courant inducteur A (*fig.* 44) est voisin de plusieurs conducteurs B, C, D, le courant

Fig. 44. Fig. 45.



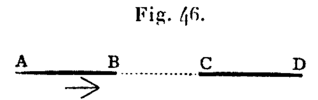
induit sur B tend à affaiblir les courants induits sur C et D; car un courant commençant en B induit sur C et D des courants de même sens que le courant originel A, et par conséquent de sens contraire aux courants déterminés par l'induction directe de A. Si l'on considère maintenant les réactions mutuelles de ces divers courants, on trouve que le courant induit sur B a une intensité plus faible que si les conducteurs C et D n'existaient pas, et que le courant inducteur A est moins entravé dans sa marche que si ces mêmes conducteurs étaient supprimés.

Un courant qui augmente ou qui diminue n'induit pas seulement une force électromotrice dans les conducteurs voisins; mais il exerce encore une action inductive sur le conducteur dans lequel il circule.

Considérons (*fig.* 45) un circuit formé par un fil qui se replie sur lui-même. Un courant qui augmente entre A et B et qui circule dans le sens marqué par la flèche, tend à induire entre C et D un courant de sens contraire. La force électromotrice est opposée au courant primitif, et elle retarde l'accroissement de celui-ci. Un courant de sens déterminé et d'intensité décroissante entre A et B tend à induire entre C et D un courant de même sens, qui a pour effet de retarder la diminution du courant inducteur. Dans les deux cas, la variation du courant inducteur est ralentie.

Un effet semblable mais beaucoup plus faible a lieu, même quand le fil est rectiligne (*fig.* 46); un courant qui marche de A vers B

Fig. 46.

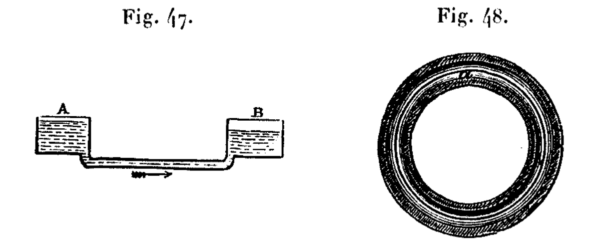


repousse un autre courant qui marche de C vers D. Si le courant AB augmente, il y a induction en avant de lui, c'est-à-dire sur CD, d'un courant de même sens. Ce courant induit entrave la marche du courant inducteur et tend à diminuer la rapidité de son accroissement.

22. Il n'est pas nécessaire que le conducteur, dans lequel se développe le courant induit, forme ce qu'on appelle un *circuit fermé*. On désigne ainsi un conducteur dans lequel un courant continu peut circuler indéfiniment, si une force électromotrice permanente est maintenue sur le fil : un anneau de fil non interrompu nous offre un exemple de *circuit fermé*. Au contraire, un *circuit ouvert* est un conducteur présentant certaines solutions de continuité, par exemple, un anneau de fil rompu sur un ou plusieurs points où la présence de l'air ou de tout autre isolant empêche la circulation d'un courant permanent. Les courants induits se produisent toujours, que le circuit soit ouvert ou fermé, mais avec des caractères très différents dans les deux cas. Dans le circuit fermé, un courant peut être induit sans qu'il y ait aucune différence de potentiel entre les diverses parties du circuit. Il est impossible qu'une différence de potentiel existe entre deux parties d'un con-

ducteur sans qu'il en résulte un courant; mais un courant peut être produit par une force électromotrice sans qu'une différence de potentiel existe. Le mouvement de l'eau dans un tuyau va encore nous servir à expliquer ce point. S'il y a une différence de niveau entre deux réservoirs en communication l'un avec l'autre (*fig.* 47), l'eau

Fig. 47. Fig. 48.



s'écoule du niveau le plus élevé vers le niveau inférieur. Mais dans le cas même où les deux réservoirs sont au même niveau, une corde tirée rapidement de A à B dans l'intérieur du tuyau entraîne par frottement une certaine quantité d'eau; une sorte d'écoulement se produit du réservoir A vers le réservoir B, dont le niveau ou potentiel de gravité va s'élever. On ne peut pas dire ici que le courant est dû à une différence de potentiel; la différence de potentiel qui résulte finalement de l'action intervenue est de sens contraire à celle qui aurait produit le courant.

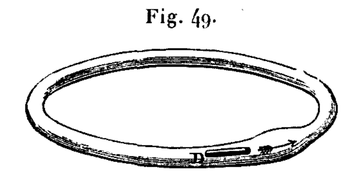
Supposons maintenant (*fig.* 48) qu'un tuyau circulaire soit rempli d'eau, et qu'un fil intérieur a tourne, en dedans de ce tuyau, autour de la ligne que l'on peut considérer comme son axe; ce fil mettra en mouvement la masse entière de l'eau sans déterminer aucune différence de pression entre deux parties quelconques de tuyau; il n'y a dans ce cas ni différence de potentiel de gravité ou de pression qui produise le mouvement, ni différence de potentiel qui soit une conséquence nécessaire du mouvement. Entre ces exemples et les circuits fermé ou ouvert, il existe une analogie facile à saisir. Dans le circuit fermé, le courant peut persister indéfiniment et aussi longtemps que le mouvement de l'aimant inducteur persiste; mais aucune différence de potentiel n'est nécessairement produite entre les diverses parties du circuit. Dans le circuit ouvert, le courant n'est pas non plus produit par une différence de potentiel entre

certaines parties du circuit; mais une force électromotrice se développe, qui pousse l'électricité positive vers l'une des extrémités du fil, et l'électricité négative vers l'autre extrémité, en produisant ainsi une différence de potentiel qui donne naissance à un courant de sens inverse, aussitôt que l'action inductrice de l'aimant a cessé; il peut arriver que le courant dû à cette force électromotrice n'ait qu'une faible intensité, dans les conditions mêmes où sur un circuit fermé l'intensité du courant induit eût été très grande. En effet une petite quantité d'électricité, dans un corps de faible capacité, est bien suffisante pour provoquer une différence de potentiel qui fasse équilibre à l'action inductrice de l'aimant. Revenons à la *fig.* 47 pour continuer notre comparaison. Si les réservoirs A et B sont de petite dimension, une très petite quantité d'eau, entraînée de A en B par le frottement de la corde, établira une différence de potentiel assez grande pour arrêter tout nouveau mouvement du liquide, bien que le frottement soit capable de déterminer un courant rapide dans le circuit fermé de la *fig.* 48. Aussitôt que la différence de potentiel entre A et B, dans le circuit ouvert, est suffisante pour déterminer un courant inverse de retour, égal à celui que l'aimant peut induire dans les conditions où il se meut, la production des courants induits est suspendue dans le circuit ouvert: de même, dans des circonstances semblables, le frottement de la corde maintient seulement la différence des niveaux et cesse de produire un courant liquide. Mais tout mouvement de l'aimant ou d'un autre système inducteur, si petit qu'il soit, est capable de produire un courant continu dans un circuit fermé; car dans ce cas aucune différence de potentiel n'intervient pour produire un mouvement électrique inverse.

23. Un cas plus compliqué se présente lorsque le circuit fermé est long et de capacité notable, et que l'action inductrice n'a lieu que sur une partie de ce circuit. Concevons un long tube élastique rempli d'eau (*fig.* 49), à l'intérieur duquel se meut une tige de faible longueur qui produit un courant par suite du frottement; ici l'eau peut s'accumuler en avant de la tige et un vide partiel se faire derrière celle-ci; il en résulte en avant de la tige une augmentation de pression, et en arrière une diminution, qui tendent toutes

deux à renverser le sens du courant produit par le frottement de la tige. De même dans certains points d'un long circuit électrique peuvent se développer des différences de potentiel qui tendent à renverser le sens du courant induit; le potentiel, comme la pression hydrostatique dans le tube, s'élève dans les parties du circuit vers lesquelles se dirige le courant positif, et s'abaisse au contraire dans

Fig. 49.



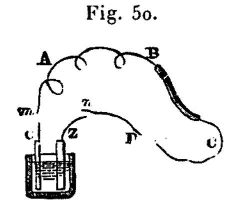
les parties dont il s'éloigne. On conclut de cette explication que des courants inégaux en intensité traversent les différentes parties du circuit : les câbles sous-marins offrent des exemples de ce genre d'effets.

24. L'intensité d'un courant *constant* dans un circuit quelconque est la même en tous les points de ce circuit; supposez qu'une portion du circuit soit formée d'un gros fil, une autre d'un fil mince, une troisième d'un électrolyte; si le courant est constant, la même quantité d'électricité traverse dans le même temps une section quelconque du circuit : c'est ce qu'on exprime en disant que l'intensité du courant est la même en chaque point. Des longueurs égales du circuit, prises dans les parties formées d'un fil mince ou épais, produisent des effets rigoureusement égaux (déviation de l'aiguille aimantée, aimantation du fer ou de l'acier, etc.). Le courant, d'égale intensité, qui traverse toute l'étendue du circuit, est indépendant de la capacité et de la nature des substances traversées. Il n'y a pas deux espèces de courants; la seule qualité qui différencie les courants et les caractérise, c'est l'intensité, c'est-à-dire la quantité d'électricité qui passe en un temps donné à travers une section de circuit. Les épithètes appliquées à un courant, telles que *grand*, *énorme*, *fort*, etc., ont toutes la même signification; elles indiquent que le courant transporte dans le circuit une grande quantité d'électricité. Un courant uniforme d'électricité est ana-

logue à un cours d'eau uniforme. Si un liquide, tel que l'eau, s'écoule d'un réservoir dans un autre à travers une série de tuyaux de différents diamètres, *tous entièrement remplis,* il s'établit à travers tous ces tuyaux un écoulement uniforme, d'après la définition précédente; c'est-à-dire que la même quantité d'eau par seconde s'écoulera dans chaque tuyau. La vitesse de l'eau varie dans chaque tuyau avec le diamètre de la section transversale; mais le courant est constant, et l'on entend par là qu'il débite par seconde un nombre déterminé de litres. Une pile convenablement choisie pour obtenir une différence constante de potentiel, un circuit métallique interpolaire, maintenu au repos, à la même température, et loin de tout système de courants ou d'aimants en mouvement, telles sont les conditions qui permettent de réaliser un courant uniforme.

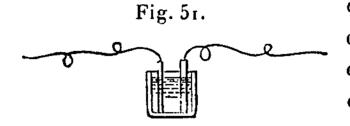
25. Il est évident que ce régime simple du courant est loin d'exister au moment même où le courant commence ou finit; on s'en éloigne bien davantage si d'autres courants sont induits dans le même circuit par la réaction d'aimants en mouvement. Les courants obtenus dans ces conditions varient en un point donné d'un instant à l'autre, et pour le même instant d'un point du circuit à un autre point. Supposons, pour prendre d'abord le cas le plus simple, que les deux pôles d'un élément de pile CZ soient réunis en *m* et en *n* aux fils AB et CD. Aussitôt que le contact est établi (*fig.* 50), l'électricité de la pile fait irruption dans les fils; elle communique d'abord une charge statique à chaque section de ces fils. Le courant se développe dans le voisinage de la pile quelque temps avant d'envahir les parties plus éloignées du circuit; son débit varie d'une section à l'autre, et dépend de l'étendue, de la capacité et de la nature des substances traversées. Cependant le flux électrique induit des courants dans tous les conducteurs voisins et se trouve lui-même entravé dans son cours par les réactions de ces courants induits. Ce n'est qu'après l'achèvement de tous ces phénomènes qu'on obtient le régime permanent qui caractérise un courant d'intensité constante, circulant dans les diverses

Fig. 50.



parties du circuit. La succession de ces phénomènes se manifeste toutes les fois qu'un signal électrique est envoyé sur une ligne télégraphique. La terre forme en général une partie du circuit télégraphique; pour compléter, c'est-à-dire pour fermer ce circuit, on établit un contact en un point seulement, tel que m, le fil étant dejà en communication permanente avec Z en n. Ces modifications dans le circuit n'enlèvent rien à la complexité des phénomènes. On parle souvent de la vitesse de l'électricité; mais ce qu'on vient de voir montre que ce mot employé sans qualification ne peut avoir aucun sens. L'électricité qui part de m n'atteint pas A, B ou C à la manière d'un boulet, mais sous la forme d'une onde qui s'accroît graduellement; le régime et la vitesse de propagation de cette onde dépendent d'un grand nombre de circonstances, telles que les dimensions transversales du fil, la nature de sa substance, son éloignement des corps voisins, etc. Si les deux pôles de l'élément sont reliés à deux fils de grande longueur, isolés à leurs extrémités (*fig.* 51); ou bien si l'un des pôles est relié à la terre et l'autre à un conducteur de dimension considérable ou à un fil isolé et très long, on obtient une série de phénomènes absolument semblables, mais avec cette différence que, pour le circuit ouvert, la condition finale d'équilibre est remplie lorsque, toutes les parties des conducteurs étant chargées au potentiel de la pile, aucun mouvement électrique ne se produit plus dans ces conducteurs.

Fig. 51.



Les lois qui président à la propagation des courants induits variables aux différents points du circuit sont encore plus compliquées; d'abord l'aimant ou, d'une manière générale, le système inducteur ne produit pas une différence de potentiel constante comme l'élément de pile; en outre, le courant qui se trouve induit dans une partie quelconque du circuit varie d'intensité quand on fait varier les positions relatives du système inducteur et du circuit.

26. Lorsque, deux métaux différents (*fig.* 27) étant réunis de manière à former un circuit, les soudures C et D sont portées à des températures différentes, une différence de potentiel, c'est-à-dire un force électromotrice, se produit à chaque soudure, et un courant

électrique se manifeste dans le circuit. Prenons pour exemple un circuit formé de fer et de cuivre, où la température d'une des soudures ne dépasse pas 300° C. ; un courant tend à se produire, à travers chacune des deux soudures, du fer au cuivre ; mais la force électromotrice qui se développe à la soudure froide l'emporte sur la force développée à l'autre soudure, et par suite le courant a lieu du fer au cuivre à travers la soudure froide. Dans cet exemple, la source d'énergie est la chaleur absorbée à la soudure chaude et restituée à la soudure froide ; mais la quantité de chaleur restituée à la soudure froide est moindre que celle qui est absorbée à la soudure chaude ; la différence est équivalente au travail effectué par le courant électrique. Ce courant est souvent désigné sous le nom de *courant thermo-électrique ;* mais il ne diffère en rien des autres courants. La force électromotrice ainsi obtenue est faible.

27. En résumé, on voit qu'on peut produire des courants par le frottement des corps non conducteurs, par les réactions chimiques, par la chaleur, par la réaction d'un autre courant, développé dans un conducteur voisin, qui se rapproche, commence ou s'accroît, ou encore qui s'éloigne, finit ou diminue ; enfin par le déplacement relatif d'un aimant voisin ou par une variation quelconque dans le magnétisme de cet aimant.

Un changement quelconque dans la distribution de la charge statique de l'électricité sur la surface des corps engendre des courants jusqu'à ce que la distribution nouvelle soit achevée et l'équilibre rétabli. On ne constate aucune différence de nature entre tous ces courants ; ils ont tous les mêmes propriétés, mais associées les unes aux autres à des degrés très variables. En étudiant les lois qui lient les courants aux autres grandeurs électriques, on reconnaît qu'il est nécessaire de distinguer le cas du courant constant, uniforme sur toute l'étendue du circuit et soustrait à l'influence des aimants et d'autres conducteurs voisins, du cas plus complexe des courants incessamment variables qui circulent en présence d'autres courants et de conducteurs ou d'aimants dont la position relative se modifie.

CHAPITRE IV.

RÉSISTANCE.

1. On a déjà vu que certains corps sont bons conducteurs, et que d'autres sont mauvais conducteurs; un conducteur imparfait est celui qui *fait obstacle* au passage d'un courant électrique. Tous les conducteurs connus opposent une *résistance* sensible au passage du courant; il faut entendre par là que si l'on réunit deux corps de capacités quelconques à des potentiels différents, le courant produit met un temps déterminé pour passer de l'un de ces corps à l'autre, quelles que soient la nature et la forme du conducteur qui les réunisse ([1]). L'intensité du courant, c'est-à-dire la quantité d'électricité qui passe par seconde d'un point à un autre quand une différence de potentiel constante est maintenue entre ces deux points, dépend de la résistance du fil ou du conducteur qui les réunit. Un mauvais conducteur ne laisse pas l'électricité s'écouler aussi rapidement qu'un bon conducteur, ou en d'autres termes, un mauvais conducteur offre plus de résistance qu'un bon conducteur. Quand il ne se produit aucun phénomène électromagnétique, le courant qui circule entre deux points, l'un au potentiel A et l'autre au potentiel B, ne dépend que de la *résistance* du conducteur réunissant ces deux points.

([1]) L'induction d'un courant sur lui-même produit un retard dans le passage de ce courant entre deux points, quand même le conducteur serait sans résistance; mais le retard dû à l'induction d'un courant sur lui-même est facile à distinguer du retard dû à la résistance.

2. Avec un conducteur donné réunissant deux points fixes, l'expérience apprend que le courant devient deux fois plus intense, si la différence de potentiel des deux points est deux fois plus grande; en d'autres termes, avec une résistance constante établie entre deux points, l'intensité du courant est simplement proportionnelle à la force électromotrice, c'est-à-dire à la différence de potentiel existant entre ces points. De plus, si l'on maintient constante cette différence de potentiel et si l'on double la longueur du fil sans modifier ni sa nature ni sa section, le courant obtenu est deux fois plus faible. En général, si la force électromotrice reste constante ainsi que la nature et la section du fil, l'intensité du courant est inversement proportionnelle à la *longueur* de ce fil. Enfin la force électromotrice, la longueur et la nature du fil étant toutes invariables, l'intensité du courant est réduite de moitié si l'on diminue de moitié l'aire de la section transversale du fil. Si donc on convient d'appeler *résistance* une quantité directement proportionnelle à la longueur du fil et inversement proportionnelle à sa section, il est établi : 1° qu'avec une différence de potentiel ou une force électromotrice donnée entre deux points fixes, l'intensité du courant est inversement proportionnelle à la résistance du fil intermédiaire; 2° qu'avec une résistance constante réunissant deux points donnés, l'intensité du courant est directement proportionnelle à la force électromotrice ou à la différence de potentiel existant entre ces points. En représentant par I l'intensité du courant, par E la force électromotrice, et par R la résistance du conducteur, on voit que I est proportionnelle au quotient $\frac{E}{R}$, et comme I ne dépend d'aucun autre élément, on peut écrire

$$I = \frac{E}{R};$$

d'où l'on tire

$$R = \frac{E}{I} \quad \text{et} \quad E = RI.$$

L'équation précédente exprime la loi de Ohm, que l'on peut énoncer ainsi :

Quand une force électromotrice engendre un courant dans

un conducteur, le rapport de la force électromotrice à l'intensité du courant est indépendant de cette intensité; ce rapport s'appelle la résistance du conducteur.

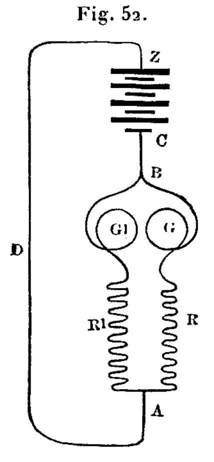
Cette définition de la résistance ne serait pas justifiée si l'on n'obtenait pas toujours une seule et même valeur de R pour un conducteur donné, quelle que soit la force électromotrice employée pour faire passer un courant à travers ce conducteur. La résistance électrique d'un conducteur n'est pas analogue à une résistance mécanique, telle que le frottement éprouvé par l'eau qui s'écoule à travers un tuyau; cette dernière résistance n'est pas constante; elle varie avec les quantités d'eau différentes qui passent dans le tuyau, c'est-à-dire avec le débit du courant liquide; au contraire, la grandeur désignée sous le nom de *résistance électrique* est tout à fait indépendante de la quantité d'électricité qui traverse une section quelconque du conducteur. De ce fait, on doit conclure que les calculs relatifs au partage des courants électriques seront en général beaucoup plus simples que les calculs relatifs au régime des courants liquides. Pour vérifier de la manière la plus facile l'exactitude de la loi de Ohm, on se sert d'un galvanomètre formé par une petite bobine de gros fil. On prend un élément de Grove, et l'on établit un circuit composé du galvanomètre et de la longueur de fil fin nécessaire pour obtenir une déviation convenable; on trouve que la déviation est sensiblement en raison inverse de la longueur du fil intercalé; quand cette longueur est doublée, la déviation est réduite de moitié. C'est ce qui aurait rigoureusement lieu si les déviations du galvanomètre étaient proportionnelles à l'intensité du courant et si la résistance du galvanomètre et celle de la pile étaient nulles. En tenant compte de ces résistances, on constate qu'avec une pile quelconque de force électromotrice constante et un galvanomètre quelconque, les déviations sont inversement proportionnelles aux résistances totales du circuit.

3. *La résistance d'un fil, de substance donnée, est proportionnelle à sa longueur et en raison inverse de l'aire de sa section transversale.* — La forme de cette section n'a pas d'influence. Ainsi la résistance est indépendante de l'étendue de la surface du conducteur, barre ou fil, parcouru par le courant; en outre, tandis

que l'électricité statique, c'est-à-dire au repos, se porte exclusivement à la surface, l'électricité en mouvement sous forme de courant se propage également dans toute la masse du conducteur.

Pour comparer deux résistances, on se sert du galvanomètre différentiel : c'est la méthode la plus facile à comprendre. Le galvanomètre différentiel est composé de deux fils identiques, recouverts de soie et enroulés l'un à côté de l'autre sur la même bobine, de façon que chacun d'eux fasse le même nombre de tours. Si ces deux fils sont traversés en sens contraire par des courants d'égale intensité, il n'y a pas de déviation ; si ces courants de sens contraires sont inégaux, le plus intense produit une déviation. Soient (*fig.* 52) G_1 et G les deux circuits du galvanomètre, R_1 et R les deux résistances qu'il s'agit de comparer. On réunit en B les deux circuits galvanométriques et en A les deux résistances ; d'autre part, on relie R_1 avec G_1 et R avec G ; enfin on complète le circuit en mettant en communication B et A par l'intermédiaire d'une pile CZ. Une partie du courant passe par GR et l'autre par G_1R_1. L'intensité de chaque courant partiel dépend de la résistance du conducteur traversé et de la différence de potentiel entre A et B qui est la même pour les deux conducteurs. Donc le courant qui traverse G et R sera de même intensité que le courant qui traverse G_1 et R_1, si les résistances de ces deux circuits dérivés sont égales. Il est facile de rendre la résistance de G_1 égale à celle de G ; dans le cas où il y a quelque différence de résistance entre les deux bobines, il suffit d'ajouter une petite longueur de fil à la bobine galvanométrique dont la résistance est la plus faible. Lorsqu'on n'obtient aucune déviation en établissant les communications que nous avons indiquées ci-dessus, on est en droit de conclure que $R = R_1$. Dans le cas où R_1 est plus grand que R, le courant qui passe à travers G_1 est moindre que celui qui passe à travers G, et une déviation se produit à droite ou à gauche ; on observe une déviation de sens contraire si R_1 est moindre que R. Par des essais successifs, on

Fig. 52.



parvient aisément à déterminer les longueurs relatives de deux fils R et R_1 de forme et de nature différentes, qui sont équivalentes au point de vue de la résistance. A l'aide du galvanomètre différentiel, on vérifie facilement la loi énoncée au commencement de ce paragraphe.

4. Puisque la résistance d'un fil de nature donnée est inversement proportionnelle à sa section transversale, elle est aussi inversement proportionnelle à son poids par unité de longueur; car, pour la même longueur de fil, le rapport des sections est égal au rapport des poids. Ainsi un fil pesant 4^{gr} par mètre présente une résistance deux fois plus petite qu'un autre fil de même substance, pesant 2^{gr} par mètre. Comme les corps n'ont pas tous le même poids spécifique, les résistances relatives des diverses substances ont des valeurs différentes selon que la comparaison a été faite sur des fils de longueur et de section égales, ou bien de longueur et de poids égaux. En traitant de la mesure des résistances, nous donnerons une table qui indique les résistances relatives de diverses substances d'après ces deux modes de comparaison. Actuellement nous nous bornerons à remarquer que le cuivre pur et l'argent pur présentent une résistance inférieure à celle de toute autre substance connue; les alliages ont une résistance plus grande que les métaux, et celle des électrolytes est beaucoup plus considérable que celle de la plupart des alliages; enfin plusieurs liquides, tels que l'huile, offrent une résistance si grande, qu'ils jouent le rôle de corps isolants. Mais tous les corps isolants connus, à l'exception des gaz, se laissent traverser comme les métaux par l'électricité; ils s'en distinguent à cet égard non par un caractère essentiel, mais par la rapidité avec laquelle s'effectue ce passage de l'électricité. Aussi les corps mauvais conducteurs ou isolants ne seront-ils désormais pour nous que des corps de résistance considérable, et sous ce rapport il y a un contraste énorme entre un corps bon conducteur et un corps isolant. Si l'on représente par 1 la résistance d'un fil d'argent à 0° C., la résistance d'un fil en argent allemand (maillechort) de même longueur et de même diamètre sera de 12,82, et celle d'une tige de gutta-percha, de mêmes dimensions que ces fils, sera d'environ 850 000 000 000 000 000 000, ou $8,5 \times 10^{20}$. La loi

de Ohm s'applique à la résistance de toutes les substances, malgré ces différences énormes.

5. La résistance de tous les corps varie avec la température. Quand celle-ci s'élève, la résistance des métaux et en général des corps bons conducteurs augmente; celle des électrolytes et des corps mauvais conducteurs diminue. Entre les résistances que présentent les corps mauvais conducteurs de nature dissemblable, il y a donc moins de différence aux températures élevées qu'aux températures basses. On voit que le passage d'un courant dans un fil métallique, par le fait même de la chaleur qu'il développe, tend sans cesse à accroître la résistance du conducteur. Ce résultat peut être aisément constaté avec un galvanomètre différentiel. Après avoir exactement équilibré R et R_1 (*fig.* 52), on modifie les communications de manière que le courant de la pile passe tout entier pendant quelques minutes à travers R_1 et G_1 seulement; si l'on remet ensuite R et G dans le circuit, on observe une déviation, et R devra être augmenté pour équilibrer R_1 jusqu'à ce que les fils aient repris leur température primitive. Des fils de longueur et de section graduées, isolés au moyen d'une enveloppe de soie et enroulés sur des bobines, servent à représenter certaines résistances définies; on appelle *bobines de résistance* les bobines de fil ainsi formées. Il est essentiel d'employer pour la confection de ces bobines une substance telle que l'argent allemand, dont la résistance varie peu avec la température; on doit d'ailleurs, dans les recherches délicates, noter, pour en tenir compte, la température des bobines de résistance au moment de l'expérience.

6. Il est indispensable de connaître la résistance des différents corps pour résoudre un grand nombre de problèmes d'électricité: pour déterminer, par exemple, la quantité d'électricité qui passe en un temps donné entre deux points d'un conducteur quelconque, ou, en d'autres termes, l'intensité du courant produit dans ces conditions; pour mesurer la variation de cette intensité correspondant à une modification quelconque dans la résistance d'un conducteur donné; pour étudier la loi de division ou de partage d'un courant qui traverse deux ou plusieurs conducteurs interposés entre deux points

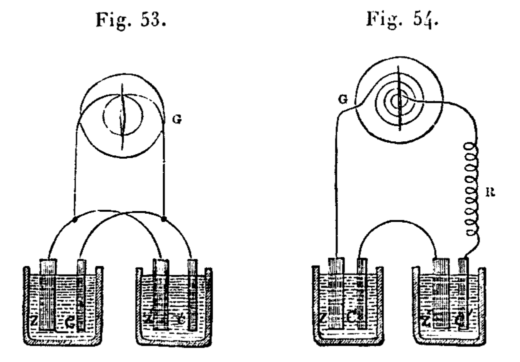
de sa route; pour constater l'effet des éléments de pile d'espèces différentes, effet variable, puisque chaque élément a une résistance intérieure qui dépend de la dimension des plaques, de la distance qui les sépare et de la nature des dissolutions employées; pour établir une comparaison entre le pouvoir isolant des corps non conducteurs; enfin pour régler en toute circonstance l'intensité d'un courant, l'augmenter ou la diminuer à volonté.

7. La résistance des substances qui entrent dans la constitution d'un élément de pile assigne une limite nécessaire à l'intensité du courant qu'il peut produire. Quand les deux métaux sont réunis par le fil le plus court et le plus gros qu'on emploie dans la pratique, la résistance du circuit se réduit sensiblement à la résistance intérieure de la pile, et pour la plupart des piles cette résistance est considérable. Dans un élément Daniell à sciure de bois, la résistance est souvent supérieure à celle de $1^{km},5$ de fil de fer de $0^{m},004$ de diamètre, épaisseur communément usitée pour les lignes télégraphiques aériennes. La résistance de l'élément Daniell ordinaire ne descend pas au-dessous de 400^{m} du même fil. L'élément Grove est beaucoup moins résistant. La résistance d'une pile diminue quand on augmente l'étendue superficielle des plaques; car cela revient à augmenter la surface de la section du conducteur liquide, dont la résistance est de 1 million à 20 millions de fois plus grande que celle des conducteurs métalliques de même dimension.

Prenez deux éléments d'une pile quelconque et réunissez-les de la manière indiquée dans la *fig.* 53, c'est-à-dire le cuivre relié au cuivre et le zinc au zinc; c'est ce qu'on appelle *réunir les éléments de pile en arc multiple.* Ainsi groupés, nos deux éléments équivalent à un élément unique dont les dimensions seraient doublées. La force électromotrice de ce système est celle de l'un ou l'autre élément; mais sa résistance est deux fois plus faible. Complétez le circuit de C à Z par l'interposition d'un galvanomètre formé d'une courte bobine de gros fil; la déviation obtenue sera à peu près le double de celle fournie par un seul élément à travers le même galvanomètre; car en réduisant à moitié la résistance de l'élément, on a à très peu près réduit à moitié la résistance totale du circuit. En second lieu, composez un circuit avec un de ces deux éléments et

un galvanomètre formé d'une bobine relativement longue de fil fin, en ayant soin de réduire l'intensité du courant, si cela est nécessaire, par l'addition d'une résistance R pour obtenir une déviation convenable; puis ajoutez le second élément en arc multiple; aucun changement sensible ne se produit dans la déviation, car la résistance actuelle du circuit est formée principalement de R et de la résistance du galvanomètre. Une diminution dans la résistance de la pile modifie à peine la résistance totale et ne change pas sensiblement l'intensité du courant. — Réunissez encore les deux éléments de la manière indiquée au Chapitre I (n° 19), c'est-à-dire le zinc au cuivre (*fig.* 13 ou *fig.* 54) : c'est ce qu'on appelle *réunir les*

Fig. 53. Fig. 54.



éléments en série. Complétez le circuit avec le galvanomètre à fil fin et avec la résistance R, comme dans la seconde expérience. La déviation est à peu près deux fois plus grande. Par l'addition du second élément en série, la résistance du circuit a un peu augmenté; mais la résistance de la pile n'est qu'une fraction insignifiante de la résistance. Ainsi, tandis que la résistance du circuit n'a pas changé sensiblement, on a doublé la force électromotrice en doublant le nombre des contacts métalliques. Or une force électromotrice deux fois plus grande produit avec la même résistance un courant d'intensité double et par suite une déviation double. — Reprenez enfin le galvanomètre à gros fil et formez un circuit complet avec ce galvanomètre et les deux éléments de pile associés en série; la déviation sera presque exactement la même que celle fournie par un seul élément et seulement la moitié de celle obtenue avec les deux éléments

réunis en arc multiple. En disposant les deux éléments en série, on a doublé la force électromotrice; mais la résistance totale du circuit est aussi à peu près doublée, et par suite le courant demeure sensiblement le même qu'auparavant. Ainsi on voit qu'avec un circuit de petite longueur ou de faible résistance extérieure, l'intensité du courant peut être augmentée, soit en augmentant la dimension des éléments, ce qui revient à réunir plusieurs éléments en arc multiple; soit en employant dans les éléments des liquides de moindre résistance spécifique. Mais l'intensité du courant ne serait pas augmentée en ajoutant à la pile des éléments en série. Dans un circuit très long ou de résistance extérieure considérable, plusieurs éléments de large surface ou un grand nombre d'éléments ordinaires réunis en arc multiple ne sauraient fournir des courants intenses; mais l'intensité du courant peut être augmentée en associant les mêmes éléments en série.

Quand la résistance de la pile n'est ni très grande ni très petite en comparaison de celle du reste du circuit, on peut accroître l'intensité du courant, soit en ajoutant des éléments en série, soit en augmentant les dimensions de ces éléments, c'est-à-dire en les réunissant en arc multiple. Par le premier procédé, on augmente la force électromotrice dans un rapport plus grand que la résistance totale; par le second, on diminue notablement la résistance du circuit sans changer la force électromotrice.

On dit quelquefois que des éléments en série sont réunis en *intensité,* et que des éléments en arc multiple sont réunis en *quantité;* ce sont là des termes qui survivent à une théorie erronée.

8. La résistance du galvanomètre destiné à indiquer la présence d'un courant dans un circuit est un élément important de ce circuit. Supposons un circuit de faible résistance où se trouve un élément de pile à large surface : le courant sera très énergique. Si nous introduisons dans ce circuit un galvanomètre formé d'une longue bobine de fil mince, il peut arriver par cela même que l'intensité du courant soit rendue mille fois plus petite. Sur des circuits de faible résistance, il faut employer des galvanomètres de faible résistance pour ne pas altérer notablement le courant qu'on se propose d'étudier. Sur des circuits de grande résistance, il faut employer des

galvanomètres de grande résistance. Ce n'est pas que la résistance propre de ces appareils présente un avantage quelconque, mais il est impossible de construire un galvanomètre sensible aux courants de faible intensité, sans recourir à une bobine composée d'un très grand nombre de tours de fil et par suite offrant une grande résistance.

9. Dans plusieurs circonstances, on voit naître dans le circuit des résistances qui ne sont qu'apparentes et ne peuvent être considérées comme des résistances proprement dites.

Lorsque dans un électrolyte le courant passe de l'électrode métallique au liquide ou du liquide à la seconde électrode, il se produit une résistance apparente considérable, c'est-à-dire que le courant est diminué par le changement de milieu beaucoup plus qu'il ne le serait par une grande longueur de métal et de liquide. On dit quelquefois que cette résistance est due à la polarisation des métaux plongés dans la dissolution. Ce mot de *polarisation* est souvent employé dans un sens très vague; il signifie ici que les plaques se chargent des produits de la décomposition de l'électrolyte et que ce dépôt amène une diminution dans l'intensité du courant. Cette diminution, qui se manifeste dans toute l'étendue du circuit, ne semble pas provenir d'une cause analogue à une résistance; elle est plutôt due à l'action d'une force antagoniste qui restitue une partie de l'énergie dépensée dans l'élément; c'est-à-dire qu'au moment où le courant primitif cesse, un courant de direction opposée ou de réaction prend naissance aux surfaces de séparation des conducteurs solide et liquide. On peut donc penser que l'intensité du courant primitif a été diminuée par la création d'une force électromotrice de sens contraire due au groupement des éléments de l'électrolyte décomposé. Quoi qu'il en soit, le nom de *résistance* est continuellement donné à la cause qui produit cette diminution du courant, même par les auteurs convaincus que cette diminution n'est pas due à une véritable résistance. Il est facile d'observer cette résistance fictive ou polarisation. Composez un circuit avec un galvanomètre, un fil de cuivre, deux éléments Daniell et deux plaques d'un même métal séparées par de l'eau ou quelque électrolyte. On constate que la déviation du galvanomètre décroît rapidement au bout de quel-

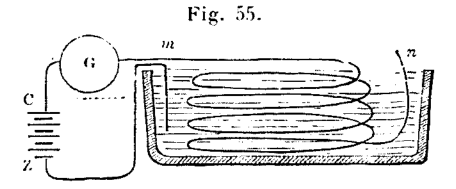
ques minutes; si alors la pile est retirée et le circuit fermé, les deux plaques métalliques envoient un courant qui fait dévier le galvanomètre en sens contraire; ce courant est d'abord très intense, puis il diminue progressivement et disparaît.

10. Lorsqu'un courant commence à s'écouler à travers un corps solide isolant, tel que la gutta-percha, un phénomène semblable intervient; le courant diminue par degré et rapidement, comme si la résistance de la gutta-percha augmentait sous l'influence du courant. Cette résistance additionnelle apparente n'est pas une véritable résistance; quand le courant principal cesse, la gutta-percha renvoie dans une direction opposée un courant qui diminue progressivement, et ce courant a précisément l'intensité et la durée nécessaires pour restituer intégralement la quantité d'électricité en apparence accumulée dans la gutta-percha, c'est-à-dire complémentaire de celle qui aurait traversé dans le même temps un conducteur de résistance constante égale à la résistance finale de la matière isolante. Cette résistance finale de la gutta-percha est considérée par quelques électriciens comme sa véritable résistance; c'est en effet la seule, parmi les valeurs variables de la résistance, qui suive la loi de Ohm; le courant plus intense qui se produit dans la première phase de l'expérience est dû, suivant cette manière de voir, non à une diminution de résistance, mais à une absorption d'électricité analogue à celle qui s'effectuerait dans une série de condensateurs. D'autres électriciens voient dans cette propriété du corps solide isolant un fait entièrement semblable à la polarisation des électrolytes liquides et admettent que la véritable résistance de la gutta-percha est celle qui se rapporte au courant produit dans le premier moment; pour ceux-ci la diminution subséquente du courant est le résultat d'une force électromotrice de sens contraire. La première manière de voir semble plus plausible à l'auteur de ce livre.

Le phénomène dont nous nous occupons est très facile à observer sur une grande longueur de fil isolé par une enveloppe de caoutchouc ou de gutta-percha. On prend (*fig.* 55) un mille (1855^m) de fil de cuivre isolé de cette manière, et du modèle dont on se sert pour les câbles télégraphiques sous-marins; on l'immerge dans une cuve remplie d'eau; on isole l'une des extrémités *n* du fil et on relie

l'autre extrémité m, par l'intermédiaire d'un galvanomètre G, avec l'un des pôles d'une pile CZ, de 50 éléments par exemple ; enfin on complète le circuit en reliant l'autre pôle de la pile avec une plaque de cuivre plongée dans la cuve. La bobine du galvanomètre doit être formée de plusieurs milliers de tours de fil fin ; il est essentiel

Fig. 55.



que tous les contacts soient isolés soigneusement. Toutes les dispositions étant prises, on établit en m la communication des fils conducteurs ; il en résulte aussitôt une impulsion violente de l'aiguille du galvanomètre, due au torrent d'électricité qui se précipite pour charger le fil. Bientôt l'aiguille s'arrête stationnaire, et l'on observe une déviation de même sens que l'impulsion, provenant d'un courant qui parcourt le circuit CGZ en traversant le galvanomètre, l'enveloppe de gutta-percha et le liquide. Cette déviation diminue peu à peu ; au bout d'une heure, elle n'est plus que les deux tiers ou même la moitié de la déviation primitive. Si l'on appelle X la déviation finale, les déviations, observées de minute en minute après la réunion des fils en m, seront respectivement

$$X + a_1, \quad X + a_2, \quad X + a_3, \quad \ldots, \quad X + a_{60}.$$

Actuellement, enlevons la pile CZ et remplaçons-la par une communication métallique indiquée sur la figure par une ligne ponctuée. Cette substitution peut se faire à l'aide de clefs ou de commutateurs, sans troubler l'isolement d'une partie quelconque du circuit. La charge accumulée dans le fil se précipite alors à travers G, en produisant un choc violent sur l'aiguille, de direction opposée mais de grandeur égale à celui qu'avait déterminé le flux primitif. A la suite de cette décharge, on observe une déviation stationnaire de même sens que celle imprimée par la décharge ; cette déviation est décroissante et prend, à la fin de chaque minute successive, des valeurs égales à

$$a_1, \quad a_2, \quad a_3, \quad \ldots, \quad a_{60}.$$

On suppose que l'expérience est faite avec un galvanomètre à réflexion, dans lequel les déviations sont proportionnelles aux intensités des courants. Les flux de charge et de décharge sont tellement violents que dans les expériences délicates on évite de les faire passer à travers le galvanomètre, de peur de l'endommager; on les dérive entre les bornes du galvanomètre par la voie qu'on appelle un *court circuit*, c'est-à-dire par un conducteur de faible résistance momentanément intercalé entre ces bornes.

11. L'électricité ne passe pas seulement d'un corps à l'autre par voie d'écoulement, sous la forme d'un courant traversant un conducteur, elle peut encore être transportée d'un lieu à un autre à travers un corps isolant tel que l'air. Quand deux conducteurs, chargés à des potentiels très différents, sont rapprochés l'un de l'autre, l'attraction de l'électricité est si grande qu'elle déchire le métal ou en général la substance du conducteur et le réduit à l'état de poussière ténue; cette poussière s'élance à travers l'espace environnant en emportant avec elle une charge d'électricité. L'air ou tout autre milieu gazeux est lui-même électrisé par son contact avec le conducteur et sert ainsi au transport de l'électricité. Pendant cette décharge électrique, il y a production de chaleur et de lumière dues probablement aux causes mêmes qui développent de la chaleur et de la lumière quand on fait jaillir des étincelles d'un morceau d'acier. On dit que les étincelles électriques ainsi obtenues ont vaincu la résistance de l'air; mais cette résistance n'a rien de commun avec la résistance proprement dite qui fait l'objet de la loi de Ohm. Les lois suivant lesquelles éclatent les étincelles, ou se forment les aigrettes sur les pointes chargées d'électricité, doivent être le sujet d'une étude spéciale. Les décharges en aigrette, lumineuses ou non, sont dues à l'accumulation de l'électricité en quantité considérable sur des pointes. L'électricité exerce sur elle-même une force de répulsion telle, que pour une charge accumulée sur un conducteur en quantité suffisante, cette force devient capable de vaincre la pression de l'air : des parcelles solides et des particules d'air fortement électrisées sont arrachées ou repoussées à la pointe du conducteur. Toute étincelle électrique fournit une preuve de ce mode de transport de l'électricité appelé *convection;* la foudre en est un

autre exemple; un troisième nous est fourni par l'aigrette qu'on voit dans l'obscurité décharger les conducteurs d'une machine électrique à frottement. L'air ou le gaz chauffé par l'étincelle devient probablement un peu conducteur de l'électricité, en sorte qu'une partie seulement de l'électricité, contenue dans l'étincelle ou dans l'aigrette, est transportée par voie de *convection;* l'autre partie est transmise par *conduction*.

12. On constate que les gaz raréfiés sont d'assez bons conducteurs. Les lois de leur résistance au passage du courant n'ont été étudiées que dans ces derniers temps et ne sont connues qu'en partie. On ne saurait dire jusqu'à quel point cette résistance suit la loi de Ohm. D'après les récentes expériences de M. Varley, le phénomène de conduction dans les gaz raréfiés obéit à la loi de Ohm; mais il y a une très grande résistance à la surface de contact entre le gaz raréfié et le conducteur métallique. Cette résistance est constante, et empêche le passage de tout courant jusqu'à ce que la force électromotrice employée dépasse une valeur déterminée et constante pour chaque substance et chaque degré de raréfaction. Un fait analogue se produit dans les électrolytes; cependant il y a cette différence, que pour les électrolytes le courant n'est sans doute jamais interrompu, quelle que soit la force électromotrice employée; mais on n'obtient une décomposition complète qu'au moment où cette force a atteint une valeur définie et constante pour chaque électrolyte. Pour montrer l'effet d'un vide partiel, on peut se servir des tubes de Geissler; ce sont des tubes de verre contenant des gaz très raréfiés; dans l'intérieur pénètrent des électrodes en fils de platine qui servent à établir les communications. En formant un circuit composé d'un de ces tubes, d'un galvanomètre et d'une pile, on n'observe aucun courant jusqu'à ce que 200 éléments environ soient mis en action. Alors le courant passe en produisant dans le tube de brillants effets de lumière, et le galvanomètre dévie. Au lieu de pile on peut employer un appareil d'induction capable de fournir une force électromotrice considérable, par exemple l'instrument bien connu sous le nom de *bobine de Ruhmkorff*.

CHAPITRE V.

MESURES ÉLECTROSTATIQUES.

1. Les connaissances que nous possédons sur l'électricité et le magnétisme sont tirées de l'observation de certaines forces, et la comparaison des intensité des courants, des quantités d'électricité, des potentiels et des résistances est toujours effectuée par la comparaison de forces agissant dans des conditions diverses. Pour mesurer des forces, il nous faut convenir d'unités fixes de longueur, de masse et de temps : nous emploierons comme unités fondamentales, pour toutes les mesures électriques, le *centimètre,* le *gramme* et la *seconde,* qui seront ainsi dans ce livre nos trois unités de longueur, de masse et de temps.

Comme on l'a vu au Chapitre I (n° 17), l'unité de *force* est pour nous la force capable de produire, au bout d'une seconde d'action, une vitesse de 1 centimètre par seconde sur une masse de 1^{gr} qui n'est soumise à aucune autre force.

Cette unité de force est à peu près la millième partie d'un gramme ; elle est exactement égale à 0,00101915 de gramme. En effet, la force représentée par le poids d'un gramme imprime dans les mêmes conditions une vitesse de 980 868 centimètres par seconde; pour réduire cette vitesse à 1 centimètre, il faut une force égale au quotient de 1^{gr} par 980 868 ou à 0,00101915. Le gramme est l'unité de force la plus communément employée dans tous les pays; mais on verra que l'unité définie plus haut et désignée sous le nom

d'*unité absolue de force* est plus commode pour les calculs; d'ailleurs, un résultat quelconque exprimé en unités absolues peut être aisément converti en unités usuelles de force, c'est-à-dire en grammes; il suffira de le diviser par le nombre 980 868 ou, ce qui revient au même, de le multiplier par le nombre 0,00101915.

L'unité absolue de travail est le travail effectué par l'unité absolue de force dont le point d'application est déplacé sur une distance de 1 centimètre; elle est égale à $\frac{1}{980\,868}$ ou 0,00101915 centimètre-gramme; en d'autres termes, pour soulever 1gr de 1 centimètre de hauteur, à la latitude de Paris, il faut dépenser une quantité de travail égale à 980 868 unités absolues de travail.

2. *En mesures électrostatiques,* l'unité de quantité d'électricité est la quantité qu'exerce l'unité de force, à travers l'air, sur une quantité égale, placée à 1 centimètre de distance.

On dit qu'une unité de différence de potentiel ou de force électromotrice existe entre deux points, quand il faut dépenser l'unité de travail sur l'unité de quantité d'électricité, pour la transporter d'un point à l'autre, à l'encontre des forces répulsives étudiées au Chapitre I.

On dit qu'une unité de résistance existe entre deux points d'un conducteur, quand l'unité de quantité passe pendant une seconde de l'un de ces points à l'autre, sous l'influence de l'unité de force électromotrice maintenue entre ces points.

Le système d'unités électriques qu'on vient de définir, et qui est basé sur les grandeurs *centimètre*, *gramme* et *seconde,* est désigné sous le nom de *système électrostatique absolu;* ces unités n'ont pas encore reçu de noms particuliers; leur emploi est surtout avantageux quand on s'occupe des phénomènes décrits au Chapitre I. Dans les paragraphes qui suivent, on trouvera les équations qui lient les différentes grandeurs électriques exprimées en fonction de ces unités.

3. L'expérience apprend que deux petits corps ou deux éléments matériels électrisés s'attirent ou se repoussent mutuellement avec une force f directement proportionnelle au produit de leurs charges

respectives q et q_1, et inversement proportionnelle au carré de la distance d qui les sépare. On a donc, d'après la définition adoptée des unités de force et de quantité,

$$f = \frac{qq_1}{d^2}. \tag{1}$$

A l'aide de cette équation, si l'on suppose la quantité q égale à q_1 ou dans un rapport connu avec q_1, et si l'on mesure la force f en unités absolues pour une distance d estimée en centimètres, on pourra déterminer les quantités q et q_1, en unités absolues. Réciproquement, si l'on connaît q et q_1 on peut déterminer l'intensité de la force que ces charges exercent à une distance donnée, par un effet sensible tel que la déviation de l'aiguille d'un électromètre. L'équation (1) ne s'applique qu'aux corps électrisés *très petits*. Si les deux corps électrisés ont des dimensions appréciables, l'induction mutuelle de ces deux corps trouble la distribution régulière de la charge à la surface, et cette distribution est modifiée à chaque variation de la distance.

4. La charge électrique que peut recevoir en un lieu donné un conducteur donné est proportionnelle à la différence de potentiel entre ce conducteur et les conducteurs voisins; si ces derniers ne sont pas isolés, leur potentiel est nul, et dans ce cas on peut dire que la charge est simplement proportionnelle au potentiel du conducteur chargé. On convient d'appeler *capacité électrique* d'un conducteur le rapport constant entre la charge et le potentiel de ce conducteur; en désignant par c, q, e la capacité, la charge et le potentiel, on a la relation

$$q = ce. \tag{2}$$

La capacité d'une sphère, éloignée de tout conducteur, est numériquement égale à son rayon. Ainsi, une sphère de $0^{m},50$ de rayon, chargée au potentiel 6, renferme 6×50 ou 300 unités d'électricité.

La capacité c_1 d'une sphère de rayon r, suspendue à l'intérieur d'une sphère creuse de rayon R concentrique à la première et non isolée, est fournie par l'équation

$$c_1 = \frac{Rr}{R - r}. \tag{3}$$

Dans cette formule, on suppose que l'air est le diélectrique qui sépare les deux sphères; avec un autre diélectrique interposé entre elles, la capacité du conducteur intérieur serait changée. La capacité d'un conducteur métallique est indépendante de la nature du métal employé. Le phénomène est beaucoup plus compliqué lorsque les corps qui doivent être chargés sont des électrolytes ou des isolants liquides ou solides.

L'équation (3) montre que si la distance des conducteurs opposés diminue, c'est-à-dire si la différence $R - r$ devient très petite, la capacité du système devient très grande. Un résultat analogue se déduit de la formule relative à la capacité d'une large plaque métallique, dont l'une des faces est séparée par une mince couche d'air d'une plaque semblable et non isolée, tandis que l'autre face est tenue éloignée de tout autre conducteur. Dans ce cas, si l'on appelle a l'épaisseur du diélectrique, e le potentiel de la première plaque et c la capacité par *unité de surface* de l'une ou l'autre plaque, on trouve que

$$c = \frac{e}{4\pi a}. \tag{4}$$

Pour obtenir la capacité totale d'une de ces plaques, on multipliera la capacité c par la surface de cette plaque, ce qui donne une approximation suffisante pour les besoins de la pratique, pourvu que a soit petit par rapport aux dimensions de cette surface; a doit être mesuré en centimètres et la surface en centimètres carrés. Toutefois, il faut remarquer que cette méthode n'est pas d'une exactitude absolue, parce que, sur les bords des plaques, la distribution de la couche électrique n'est pas uniforme, comme cela a lieu dans les parties centrales. En augmentant la surface et en diminuant a, on peut accroître indéfiniment la quantité d'électricité que contiendra la plaque ou le conducteur élevé à un potentiel donné. Cette quantité sera toujours calculée au moyen de la relation $q = ce$.

5. Le système formé par deux conducteurs que l'on oppose l'un à l'autre, dans le but d'obtenir une grande capacité avec une surface relativement petite, s'appelle un *condensateur*. La capacité d'un condensateur dépend du diélectrique qui sépare les conducteurs.

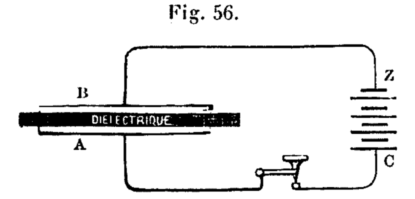
Si on substitue la gutta-percha à l'air, la capacité devient environ 4,25 fois plus grande. Le coefficient par lequel il faut multiplier la capacité d'un condensateur à air, pour obtenir la capacité du même condensateur dans lequel l'air serait remplacé par un autre diélectrique, est constant pour chaque substance et s'appelle *la capacité inductive spécifique* du diélectrique. Cette quantité est d'une extrême importance en Télégraphie, et sera désignée désormais par la lettre K. Elle a été déterminée approximativement pour quelques substances; le Tableau qui suit indique les résultats obtenus :

Valeurs de K *pour quelques substances.*

Air	= 1 »	Caoutchouc	= 2,8
Résine	= 1,77	Caoutchouc vulcanisé de Hooper	= 3,1
Poix	= 1,80	Gutta-percha de Smith.	= 3,59
Cire d'abeille	= 1,86	Gutta-percha	= 4,2
Verre	= 1,90	Mica	= 5 »
Soufre	= 1,93	Paraffine (¹)	= 1,98
Laque	= 1,95		

6. Ces nombres ne sont que des résultats approximatifs, et il est impossible, en effet, d'obtenir une exactitude rigoureuse, à cause d'une propriété singulière que présentent tous les corps solides diélectriques. Dès que l'une des plaques A du condensateur est mise en contact avec l'une des électrodes C d'une pile, l'autre électrode Z étant en communication avec la terre ou avec la seconde plaque du condensateur (*fig.* 56), une charge se précipite sur A avec une

Fig. 56.



extrême rapidité, et la plaque est d'abord élevée au potentiel désiré; mais l'afflux d'électricité ne cesse pas au bout d'un temps très court, comme il arrive pour le condensateur à air; au contraire, il persiste

(¹) Gibson et Barclay.

pendant plusieurs heures, bien qu'il décroisse rapidement. Ce phénomène est celui dont nous nous sommes déjà occupés au Chapitre IV (n° 10), au point de vue de son influence sur le régime des courants. De même, lorsqu'on réunit les deux plaques du condensateur au moyen d'un fil, pour les ramener au même potentiel, l'électricité se décharge d'abord très rapidement; mais cette décharge ne s'effectue pas instantanément d'une manière complète : l'électricité continue à s'écouler des armatures pendant un temps précisément égal à celui qu'elle avait mis pour les charger. De plus, la vitesse de la charge est égale à celle de la décharge au bout du même intervalle de temps. Pour fixer les idées, supposons qu'on maintienne une différence de potentiel e entre les armatures en les reliant aux pôles d'une pile; si l'on trouve qu'au bout de trente minutes de contact ou de charge une quantité q d'électricité pénètre par seconde dans ce condensateur, on constatera que, trente minutes après le moment où les armatures sont réunies directement, ou, comme on dit ordinairement, au bout de trente minutes de décharge, la même quantité q s'écoule en une seconde de l'une des armatures vers l'autre. Au point de vue de l'effet produit, le diélectrique pourrait être comparé à une sorte d'éponge : il s'imbibe d'électricité dans une proportion qui dépend de la différence de potentiel établie entre les armatures, et il restitue ensuite cette électricité quand les deux armatures sont ramenées au même potentiel. Ainsi un condensateur, dont les armatures sont séparées par une lame de verre ou de paraffine, n'a pas une capacité aussi bien définie que celle d'un condensateur à air. En général, on prend pour la capacité d'un condensateur celle qui correspond à la quantité d'électricité reçue au premier contact. Lorsqu'en déchargeant un condensateur on rompt le contact entre les armatures aussitôt après l'avoir établi, la restitution progressive de la charge, qui a été pour ainsi dire absorbée, élève le potentiel de l'armature qu'on avait d'abord fortement électrisée; une charge s'accumule sur cette armature, et, si l'on établit un nouveau contact entre les armatures, une décharge considérable se produit de nouveau; avec un condensateur de grande dimension, on peut obtenir des décharges successives de ce genre pendant plusieurs heures; on les appelle *décharges résiduelles*. La même loi existe pour les charges; si, après avoir

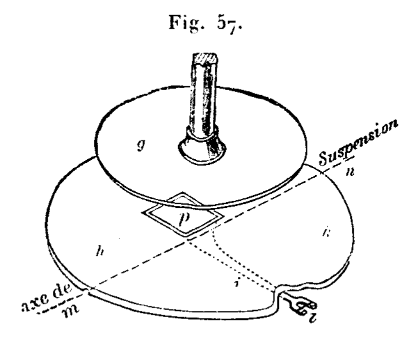
chargé l'une des armatures à un potentiel donné, on l'isole, le potentiel tombe peu à peu, à cause de l'absorption opérée par le verre ou la gutta-percha; en rétablissant la communication entre l'armature et la pile, on peut introduire une nouvelle charge dans cette armature et relever son potentiel. Cette absorption apparente de l'électricité par le diélectrique est attribuée par quelques auteurs à une polarisation que déterminerait l'*électrisation* continue du diélectrique; le mot *polarisation*, comme celui d'*induction*, est appliqué à une grande variété de phénomènes qui n'ont à peu près rien de commun.

Les faits qu'on vient d'analyser sont faciles à observer avec un condensateur formé d'un ou deux kilomètres du fil recouvert de gutta-percha dont on se sert pour les lignes télégraphiques souterraines. Le fil de cuivre est l'une des armatures; si la gutta-percha est protégée par une feuille de plomb ou d'étain, comme il arrive souvent, cette enveloppe métallique constitue la seconde armature; ou bien encore, si le fil recouvert simplement de gutta-percha est immergé dans une cuve remplie d'eau, cette eau forme la seconde armature du condensateur. Avec un galvanomètre sensible et une pile de 50 éléments ou même une pile moins forte, il est facile d'observer tous les phénomènes qui viennent d'être décrits. On peut se procurer des condensateurs de volume moindre et de capacité égale chez les fabricants d'appareils télégraphiques. Lorsqu'on prend pour condensateur une bouteille de Leyde ordinaire de petite capacité, posée sur une tablette isolante, on peut effectuer les décharges résiduelles; elles se manifestent sous la forme d'une série d'étincelles quand la bouteille de Leyde a été chargée à un haut potentiel au moyen d'une machine électrique à frottement.

7. Une petite plaque p mobile, soutenue par la torsion d'un fil mn, est disposée (*fig.* 57) à l'affleurement des bords d'une autre plaque hh, plus large et fixe, qui l'entoure de tous côtés. En face de ces plaques est disposée parallèlement une troisième plaque g non isolée. Dans ces conditions, si par un procédé quelconque on établit une différence de potentiel constante e entre g et les plaques p et h, la quantité d'électricité répandue sur l'unité de surface de la plaque p sera, d'après la formule (4), égale à $\frac{e}{4\pi a}$.

L'électricité, positive par exemple, sera distribuée uniformément sur la plaque p, et l'électricité de nom contraire sera distribuée de

Fig. 57.



la même manière sur la face opposée de la plaque g. La force totale avec laquelle la plaque p est attirée vers g sera donnée par l'équation

$$\text{(5)} \qquad F = \frac{e^2 S}{8\pi a^2}.$$

S est la surface de la plaque p estimée en centimètres carrés; e et a ont les significations déjà connues ([1]).

Il est possible de construire un appareil dans lequel cette force est réellement mesurée, soit par des poids, soit par la réaction équivalente d'un ressort élastique; cet appareil existe et constitue ce qu'on appelle un *électromètre absolu* (électromètre à anneau de garde de sir William Thomson), qui permet de déterminer la différence de potentiel e des deux plaques :

$$e = a\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}.$$

F doit évidemment être exprimée en unités absolues.

8. Par cette méthode, on a trouvé que l'élément Daniell ordinaire produit entre ses électrodes une différence de potentiel égale à

([1]) *Voir* le Mémoire de sir W. Thomson *Sur la théorie mathematique de l'Électricité en équilibre* (*Philos. Mag.*, 1854, 2e semestre). Ce Mémoire a été réimprimé en 1872 en un volume intitulé *Électrostatique et Magnétisme*.

0,00874. L'expérience avait montré que l'attraction mutuelle des disques est de $0^{gr},057$ par centimètre carré pour une distance des disques égale à $0^{m},01$ et pour une différence de potentiel produite par une pile de 1000 éléments Daniell.

Si les pesées avaient eu lieu à Paris, on aurait eu

$$F = 980\,868 \times 0,057 \text{ unités absolues de force;}$$

mais, à Glascow, où l'accélération de la pesanteur est plus grande, l'unité absolue de force, d'après la définition donnée au n° 1, est moindre qu'à Paris, en sorte que l'on a

$$F = 981,4 \times 0,057 \text{ unités absolues de force.}$$

En substituant cette valeur dans l'équation (5) et posant $a = 1$ et $S = 1$, nous déduisons $e = 3,74$ pour la différence de potentiel correspondant à 1000 éléments Daniell associés en série.

Portant cette valeur de e dans l'équation (4), on trouve qu'un condensateur à air, dont les armatures sont distantes de 1^{mm} et ont une étendue superficielle de 1^{mc}, accumulerait

$$10\,000 \times \frac{3,74}{4\pi \times 0,1} = 2976 \text{ unités absolues de quantité,}$$

s'il était chargé par une pile de 1000 éléments Daniell.

Si les plaques du condensateur étaient séparées par de la gutta-percha au lieu d'air, la charge aurait été de

$$4,2 \times 2976 = 12499 \text{ unités absolues de quantité;}$$

le coefficient 4,2 est la capacité inductive spécifique du diélectrique interposé, d'après le Tableau du n° 5.

Une sphère de $0^{m},01$ de diamètre électrisée au moyen de 1000 éléments Daniell prendrait une charge égale à $0,5 \times 3,74 = 1,87$ unité absolue de quantité. En effet, pour obtenir cette charge, il faut, d'après l'équation (2), multiplier le potentiel e ou 3,74 par la capacité c de la sphère que l'on sait être exprimée par son rayon ou 0,5.

De la charge ainsi calculée on peut déduire la force exercée par cette sphère sur une sphère égale et électrisée de la même manière,

quand ces deux sphères sont assez éloignées l'une de l'autre pour que la couche électrique reste uniformément distribuée à leur surface. D'après l'équation (1), ces sphères, écartées à une distance de 1^{m} l'une de l'autre, se repoussent avec une force égale à

$$\frac{1,87 \times 1,87}{10\,000} = 0,00035 \text{ unités absolues de force.}$$

Pour convertir ce résultat en unités de force usuelles, c'est-à-dire en grammes, il suffira de le diviser par 981,4, ce qui donne 0^{gr},000 000 357. Lorsque les sphères sont plus rapprochées, le calcul de leurs attractions ou répulsions réciproques devient extrêmement compliqué, à cause du changement qui s'opère dans la distribution de l'électricité sur leurs surfaces.

9. La capacité d'un long conducteur cylindrique de diamètre d et de longueur L, enveloppé par un conducteur cylindrique concentrique de diamètre D et séparé de ce second conducteur par un corps isolant de capacité inductive spécifique K, a pour valeur

$$(6) \qquad c = \frac{KL}{2 \log_\varepsilon \frac{D}{d}} = \frac{KL}{4,6052 \log \frac{D}{d}}.$$

Dans cette relation, $\log_\varepsilon$ désigne un logarithme naturel et log un logarithme népérien.

La longueur du cylindre est supposée assez grande pour que la capacité de ses deux bases puisse être négligée.

La formule (6) est applicable au fil isolé dont on se sert pour les câbles sous-marins. La capacité d'un mille du câble atlantique anglais est exprimée par

$$c = \frac{4,2 \times 185\,531,76}{4,6052 \times \log 3,28} = 328\,000;$$

car 185 531,76 est le nombre de centimètres contenus dans un mille anglais, et 3,28 est le rapport entre le diamètre extérieur de la gutta-percha et le diamètre du fil conducteur; d'ailleurs on a

$$K = 4,2.$$

Il résulte de ce qui précède que l'électricité accumulée dans un mille de ce câble, chargé au moyen de 100 éléments Daniell, est égale à 0, 374 × 328 000 = 122670 unités absolues de quantité. C'est la quantité condensée dans le câble ou restituée par lui sur une longueur de 1 mille, chaque fois qu'une charge ou une décharge est effectuée. Par suite, s'il faut un centième de seconde pour charger 200 milles du câble, l'intensité moyenne du courant, c'est-à-dire la quantité d'électricité fournie par chaque élément pendant un centième de seconde, sera égale à

$$\frac{122\,670 \times 200}{100} = 245\,340 \text{ unités absolues d'intensité.}$$

10. La *densité électrique* est la quantité d'électricité que contient chaque centimètre carré d'un conducteur chargé. Les équations (2), (3) et (4) permettent de calculer sa valeur pour les sphères et les condensateurs formés de plateaux parallèles. L'équation (4) est applicable à un condensateur de forme quelconque dont les armatures ont un rayon de courbure très grand par rapport à l'épaisseur a du diélectrique; elle est donc aussi applicable à la bouteille de Leyde ordinaire, mais à la condition de multiplier le résultat obtenu par le nombre qui exprime la capacité inductive spécifique du diélectrique. L'attraction ou la répulsion électrique, exercée sur une *petite* quantité q d'électricité qui se trouve à l'extérieur et très près d'une surface électrisée, se calcule aisément quand on connaît la densité électrique ρ sur l'élément de surface voisin. Cette force est normale à la surface et a pour valeur à travers l'air

$$(7) \qquad 4\pi\rho . q = \mathrm{R} . q.$$

R est la *force électrostatique* sur un point extérieur très voisin de la surface, c'est-à-dire la force qu'exerce la charge totale de la surface électrisée sur chaque unité de quantité de la petite charge q.

Si l'on met en regard l'une de l'autre deux surfaces conductrices parallèles, présentant une différence de potentiel e et séparées par une distance a très petite par rapport à leurs dimensions, la force électrostatique résultante R tend à repousser une charge élémentaire de l'une des surfaces vers l'autre et dans une direction perpendiculaire. La force répulsive F sur la charge q est constante et a

pour valeur, d'après les notations précédentes,

$$(8) \qquad F = Rq = \frac{e}{a} q.$$

Le travail effectué par la force F sur la quantité q qui s'est transportée de l'une des surfaces à l'autre est

$$Fa = eq.$$

A potentiel égal, la densité électrique sur une sphère de petit diamètre est beaucoup plus grande que sur une sphère de grand diamètre ; car la capacité d'une sphère augmente proportionnellement au rayon, tandis que la surface croît proportionnellement au carré du rayon. Il en résulte, d'après l'équation (2), qu'une sphère infiniment petite, chargée à un potentiel déterminé, aurait une densité superficielle et, par suite, une force électrostatique infiniment grande; elle exercerait donc une attraction ou une répulsion infiniment grande sur tout corps électrisé placé dans le voisinage immédiat de sa surface; comme, en fait, elle repousserait ses propres particules avec une force de grandeur infinie, on peut conclure qu'il est impossible de charger une sphère de petit diamètre à un potentiel élevé. Cette déduction est justifiée par l'expérience. La distribution de la couche électrique sur les conducteurs qui présentent des pointes ou des angles est telle que la densité devient très grande sur ces parties, comme cela a lieu sur une sphère de très petit diamètre, même lorsque le potentiel n'est pas très élevé. De là résulte une forte répulsion de l'électricité sur elle-même ou plutôt entre les particules voisines de la matière qui en est chargée. Aussi voit-on souvent la matière électrisée s'échapper au dehors sous la forme d'étincelle ou sous celle d'aigrette électrique. Tout ce qui tend à produire une densité considérable en un point quelconque de la surface d'un conducteur chargé tend à produire l'étincelle. Si, par exemple, on approche le doigt d'un conducteur chargé, la densité électrique est augmentée par induction sur les parties opposées au doigt et peut devenir assez grande pour que l'étincelle jaillisse. L'accroissement de la densité ne suppose pas nécessairement l'accroissement du potentiel, à moins que la forme et la position des conducteurs ne demeurent constantes; dans ce cas, on ne peut augmenter la densité qu'en augmentant le potentiel.

11. La répulsion de l'électricité sur elle-même produit une véritable diminution de la pression atmosphérique sur la surface d'un conducteur chargé. On peut mettre en évidence l'effet mécanique de cette force en électrisant une bulle de savon; celle-ci augmente de volume quand on la charge, et se dégonfle quand on la décharge. Si l'on désigne par p la pression que l'électricité exerce sur l'atmosphère par centimètre carré de surface, c'est-à-dire la *pression électrique sur l'air*, on a

$$p = 2\pi\rho^2. \tag{9}$$

Comme cette densité est égale à $\frac{R}{4\pi}$, d'après le n° 10, on peut écrire

$$p = \frac{R^2}{8\pi} \text{ en unités de force absolues,}$$

ou

$$p = \frac{R^2}{8\pi \times 981,4} \text{ en grammes.}$$

La pression électrique sur l'air, au moment où l'étincelle jaillit entre deux plaques parallèles légèrement convexes, a été calculée par sir William Thomson, et les résultats de ses expériences sont consignés dans le Tableau suivant :

LONGUEUR des étincelles en centimètres. a	FORCE électrostatique à la surface en unités absolues (*voir* n° 10). R	FORCE électromotrice, ou différence de potentiel qui a produit l'étincelle de longueur a en unités absolues (*voir* n° 10). $e = R \times a$	PRESSION exercée sur l'air par l'électricité de l'une et l'autre surface au moment où l'étincelle éclate, et calculée en grammes par centimètre carré. $p = \frac{R^2}{8\pi \times 981,4}$
0.00254	527.7	1.34	11.290
0.00508	367.1	1.87	5.49
0.0086	267.1	2.30	2.89
0.0190	224.2	4.26	2.04
0.0408	151.5	6.19	0.931
0.0688	140.8	9.69	0.806
0.1325	131	17.35	0.696

On remarquera que la force électrostatique n'est pas constante, comme on pouvait le prévoir, et que la force électromotrice nécessaire pour produire l'étincelle n'augmente pas proportionnellement à la longueur de l'étincelle; le rapport de cette force à la distance explosive est moindre pour les longues étincelles que pour les courtes. Il résulte de la mesure rapportée au nº 8 qu'il faudrait une pile d'environ 2600 éléments Daniell pour produire une étincelle de $0^{cm},0688$ de longueur entre deux surfaces légèrement convexes; en effet, 1000 éléments donnant une force électromotrice égale à 3,74, il faudra pour obtenir une force électromotrice de 9,69 valeur correspondante à la *distance explosive* de $0^{cm},0688$, un nombre x d'éléments donné par l'équation

$$x = 1000\,\frac{9,69}{3,74} = 2591.$$

En observant la longueur de l'étincelle qu'on peut obtenir dans des circonstances semblables avec un condensateur donné, par exemple avec une bouteille de Leyde, il est possible d'estimer approximativement le potentiel auquel ce condensateur a été chargé.

12. Les aigrettes ou étincelles qui s'échappent des pointes chargées à un potentiel élevé montrent que dans tous les appareils destinés à demeurer chargés à un haut potentiel il faut éviter toute pointe ou arête sur les surfaces extérieures. On peut aisément soutirer d'une pointe, par une décharge invisible et silencieuse, la plus grande partie de la charge d'un conducteur sans qu'il y ait aucun contact direct avec le conducteur qui provoque la décharge. On dit souvent que les pointes enlèvent de l'électricité à tous les corps électrisés du voisinage. Leur action est la suivante : si elles sont fixées sur un conducteur isolé et placées près d'un corps électrisé A, elles se chargent par induction d'électricité de signe contraire. Cette électricité s'échappe au dehors sous forme d'étincelle ou par une décharge silencieuse, et laisse sur le conducteur isolé une charge électrique de même signe que celle contenue sur A. Cette propriété des pointes explique l'action des paratonnerres. La foudre est une immense étincelle électrique qui jaillit entre deux nuages ou bien entre un nuage et la terre; dans ce dernier cas, le nuage électrisé est attiré vers des points en saillie ou des corps bons con-

ducteurs qui s'électrisent eux-mêmes par induction, et l'éclair se produit quand la différence de potentiel est assez grande pour vaincre la résistance mécanique de l'air. Si le corps électrisé qui fait saillie au-dessus du sol est armé d'une pointe reliée à la terre par de bons conducteurs, tels que d'épaisses tiges de cuivre, il arrive qu'aussitôt que la pointe atteint un potentiel même peu élevé, l'électricité s'en échappe pour se répandre dans l'air.

Il est impossible d'électriser fortement par induction un corps qui fait saillie, de même qu'il est impossible de remplir d'eau une cuve à parois disjointes; les nuages électrisés ne sont plus attirés vers les corps voisins de ce conducteur, et même s'il arrive qu'ils y soient poussés en masse assez grande pour que le jet électrique fourni par la pointe ne puisse empêcher l'étincelle de passer, l'étincelle jaillira, mais seulement du nuage à la pointe, parce que la densité électrique et l'attraction seront plus grandes à cet endroit qu'en tout autre lieu du voisinage. L'électricité qui s'écoule dans la terre par l'intermédiaire d'un bon conducteur, tel qu'un métal, ne cause aucun dégât et ne laisse aucune trace de son passage; au contraire, une étincelle qui éclate à travers un corps isolant ou un mauvais conducteur le brise ou le réduit en poussière sur sa route. On peut s'en assurer en faisant traverser par une étincelle un bloc de verre ou une feuille de carton : le premier se fendille et éclate, la seconde est déchirée ou percée d'un trou. Pour produire des effets mécaniques de cette nature, il faut une force électromotrice beaucoup plus grande que pour frayer à l'électricité un passage à travers une égale épaisseur d'air. Aussi peut-on souvent empêcher le passage des étincelles entre deux conducteurs en recouvrant l'un d'eux d'ébonite, de verre ou de toute autre substance isolante très dure.

Sir W. Thomson a constaté que, si un conducteur portant des pointes ou des arêtes vives est entouré par un autre conducteur présentant partout une surface unie et sans aspérités, la différence de potentiel qu'on peut établir entre eux sans produire de décharge disruptive est beaucoup plus grande lorsque les pointes et les arêtes sont positives que lorsqu'elles sont négatives.

13. La recherche de la distribution de l'électricité sur deux

surfaces opposées l'une à l'autre offre une extrême complication quand ces surfaces n'ont pas une forme géométrique simple. En général, on sait que la densité est très grande aux points où les conducteurs opposés sont très rapprochés et sur les parties qui présentent des arêtes ou des pointes; on sait encore que cette densité croît proportionnellement à la différence de potentiel et aussi à la capacité inductive spécifique du diélectrique. Il faut surtout se rappeler que la charge ou la densité électrique sur deux surfaces opposées dépend de la différence de leurs potentiels et non de leur potentiel absolu ; de sorte qu'en électrisant la surface extérieure d'une bouteille de Leyde, déjà chargée et isolée, on élève à la fois le potentiel des deux armatures extérieure et intérieure. Pour la même raison, la charge communiquée à un condensateur dont les armatures sont reliées aux deux électrodes d'une pile, est toujours la même, que ces électrodes soient maintenues isolées ou que l'une soit mise à la terre; en d'autres termes, la quantité qui passe de l'une des armatures à l'autre, quand on les réunit, demeure la même; mais la quantité qui s'échappe de l'une ou l'autre de ces armatures pour se rendre dans le sol dépend du potentiel de cette armature. Toute modification dans la quantité totale de la charge d'un conducteur change son potentiel, de même que toute modification dans le potentiel change la charge. En mettant un conducteur chargé en contact avec un autre conducteur au même potentiel, on ne modifie la distribution de la charge sur aucun d'eux; mais si l'on met en contact deux conducteurs dont les potentiels diffèrent, il y a nécessairement une distribution nouvelle de la charge électrique, parce que les deux conducteurs prennent un potentiel intermédiaire. M. F.-C. Webb, dans son *Traité sur l'accumulation et la conduction électriques,* a donné plusieurs exemples intéressants de la distribution de l'électricité dans divers cas particuliers. Les considérations théoriques qui précèdent expliquent les résultats qu'il indique.

14. Les lois simples qui lient ensemble le potentiel, la quantité, la capacité, la densité et les attractions ou répulsions électriques sont maintenant connues du lecteur; on a également fait connaître la nature des unités qui expriment et définissent le potentiel, la quan-

tité et la capacité en fonction de la longueur, de la masse et du temps. L'intensité d'un courant a nécessairement pour mesure la quantité d'électricité qui passe en une seconde; quant aux résistances, elles sont exprimées en fonction de la résistance du fil qui permet à l'unité d'intensité de courant de passer dans l'unité de temps, lorsque l'unité de force électromotrice agit entre les deux extrémités de ce fil. On peut se faire une idée de la grandeur de ces unités par une représentation matérielle. Cette résistance de comparaison est à peu près équivalente à celle d'une colonne de mercure à 0° C. de 100 millions de kilomètres de longueur et de $\frac{1}{1000}$ de millimètre carré de section; elle est environ 5000 fois plus grande que la résistance opposée au courant par l'enveloppe en gutta-percha d'un mille de câble sous-marin, ainsi qu'il résulte des observations des électriciens; et par suite cette unité est sensiblement égale à la résistance d'isolement de $0^m,32$ de fil recouvert de gutta-percha.

L'unité d'intensité est l'intensité courant qui serait engendré par une pile d'environ 268 éléments Daniell à travers l'unité de résistance qu'on vient de définir. L'unité de quantité d'électricité est la quantité répandue sur une sphère de $0^m,01$ de rayon, qui serait chargée par une pile de 268 éléments Daniell associés en série, l'un des pôles de cette pile étant en communication avec la terre. La décharge d'une pareille quantité en une seconde produirait un courant de même intensité que le courant engendré par une pile de 268 éléments Daniell à travers notre unité de résistance (colonne de mercure ou enveloppe de gutta-percha). Telle est la série des unités basées sur le centimètre, le gramme et la seconde, qu'on appelle *électrostatiques absolues*. Ces unités sont surtout d'un emploi commode dans les calculs concernant l'électricité statique; mais quand on traite des courants et des aimants, il est plus avantageux de se servir d'une autre série d'unités; d'ailleurs l'emploi de ces deux séries distinctes n'offre pas plus d'inconvénients que l'usage de l'are et du centiare en arpentage ou du centimètre et du mètre carré dans les arts mécaniques.

15. Les quatre unités électrostatiques principales, c'est-à-dire la quantité, la force électromotrice, la résistance et la capacité, se déduisent directement des quatre équations fondamentales.

Dans l'équation (1) (n° 3),

$$f = \frac{qq_1}{d^2};$$

si l'on pose $q = q_1$, on déduit immédiatement l'unité de quantité en fonction de l'unité de force.

On sait que le travail effectué dans le transport d'une quantité q d'électricité entre deux points dont les potentiels diffèrent de e est égal au produit eq; en sorte que w exprimant ce travail, on a

$$(10) \qquad e = \frac{w}{q}.$$

Cette formule donne l'unité de différence de potentiel en fonction de q et de l'unité de travail.

D'autre part, par définition (n° 14), l'intensité du courant i est fournie par la relation

$$i = \frac{q}{t},$$

q désignant la quantité qui passe dans le temps t; nous obtenons ainsi l'unité de courant en fonction de q et de l'unité de temps.

La loi de Ohm $r = \frac{e}{i}$ donne l'unité de résistance en fonction de e et de i.

Enfin les unités de capacité et de densité dérivent directement, la première des unités de potentiel et de quantité, et la seconde des unités de surface et de quantité.

Soit c la capacité d'un conducteur, on a

$$c = \frac{q}{e},$$

q étant la charge électrique attribuée au conducteur sous l'influence de la force électromotrice e.

CHAPITRE VI.

MAGNÉTISME.

1. Un *aimant* dans le sens vulgaire de ce mot est un morceau d'acier qui possède la propriété singulière d'attirer le fer à ses extrémités. Certains minerais de fer appelés *pierres d'aimant* jouissent de la même propriété.

Si un aimant A est libre de s'orienter dans une direction quelconque, la présence d'un autre aimant B assujettit le premier aimant A à se placer dans une position déterminée par rapport à B. La position qu'un aimant tend à prendre par rapport à un autre est définie sans difficulté, au moyen d'une ligne imaginaire occupant une position fixe dans chaque aimant et désignée sous le nom d'*axe magnétique*. On constate que la force exercée par un aimant long et mince se manifeste avec le plus d'énergie vers ses extrémités, lesquelles possèdent d'ailleurs, ainsi qu'on le verra bientôt, des qualités opposées; à cause de cette particularité, on a donné le nom de *pôles* aux extrémités des aimants longs et minces. D'ordinaire on considère ces pôles comme des centres de force; mais ce n'est que dans le cas d'aiguilles longues, infiniment minces et uniformément aimantées, qu'il est possible de regarder les pôles comme de simples points jouant le rôle de centres de force; néanmoins on est tellement habitué à voir dans un aimant deux pôles capables d'exercer des forces de sens contraires et réunis l'un à l'autre par un barreau inactif; et d'autre part cette idée représente les faits

avec tant d'exactitude dans un grand nombre de cas, qu'on s'y conformera dans cet Ouvrage. L'axe magnétique, dont nous avons parlé plus haut, est la ligne qui joint les pôles imaginaires.

2. Un aimant, mobile autour de son centre, prend une position définie par rapport à la terre qui se comporte elle-même comme un aimant. Le pôle, qui tend à se diriger vers le nord de la terre, est appelé *pôle nord;* l'autre pôle, qui tend à se diriger vers le sud, est appelé *pôle sud.* Les pôles nord de deux aimants se repoussent mutuellement; il en est de même de leurs pôles sud; mais un pôle nord attire un pôle sud. D'après cela, le pôle nord d'un aimant est de même nature que le pôle sud de la terre; le pôle de l'aimant, semblable au pôle sud de la terre, est quelquefois appelé *pôle positif;* l'autre pôle de l'aimant, c'est-à-dire le pôle sud, est appelé *pôle négatif.* Lorsqu'on brise un aimant, chaque fragment est un aimant complet, ayant un pôle nord et un pôle sud.

3. L'*intensité magnétique* d'un pôle est proportionnelle à la force qu'il est capable d'exercer sur un autre pôle donné, à une distance donnée. Il en résulte que la force f, développée entre deux pôles, d'intensités m et m_1, est proportionnelle au produit mm_1; cette force est aussi inversement proportionnelle au carré de la distance d qui sépare les deux pôles ; elle ne dépend d'aucune autre quantité, et par suite, en faisant un choix convenable d'unités, nous avons

$$f = \frac{mm_1}{d^2}. \tag{1}$$

L'intensité d'un pôle est une grandeur qui doit être mesurée en fonction d'une certaine unité. Si l'on fait $f = 1$, $d = 1$ dans l'équation précédente, le produit mm_1 doit aussi être égal à l'unité, et l'on déduit la définition suivante : *L'unité absolue de pôle est le pôle que repousserait un pôle égal de même nom, situé à l'unité de distance, avec l'unité absolue de force.* La force f sera une attraction ou une répulsion, suivant que les pôles sont de même nom ou de noms contraires. Le nombre m est positif s'il représente l'intensité du pôle nord, et négatif s'il mesure celle du pôle sud; par suite, une attraction est affectée, dans la formule (1), du signe — et une répulsion du signe +.

4. Remarquons que la présence d'un aimant modifie d'une certaine manière l'espace environnant, puisque tout autre aimant transporté dans cette région est soumis à une force particulière. Pour simplifier le langage, on appelle souvent *champ magnétique* la région de l'espace qui entoure un aimant ; et, pour la même raison, l'effet exercé par un aimant en un point du champ est considéré comme produit par le champ magnétique et non par l'aimant lui-même. Ces expressions sont d'autant mieux appropriées qu'elles s'appliquent à un état identique ou semblable de l'espace, déterminé par le passage de courants électriques dans le voisinage, sans l'intervention d'aucun aimant. Comme le champ magnétique est caractérisé par l'existence d'une force définie en chaque point, on peut exprimer numériquement les propriétés du champ en déterminant l'intensité et la direction de cette force ou, comme on dit habituellement, l'*intensité du champ* et la *direction des lignes de force*.

Cette direction en un point du champ est la ligne suivant laquelle la force tend à entraîner un pôle libre, placé en ce point. L'intensité H du champ est proportionnelle à la force f qui sollicite ce pôle libre; et comme cette force est aussi proportionnelle à l'intensité m du pôle introduit dans le champ et ne dépend d'aucune autre quantité, on peut écrire

$$f = m\text{H}. \tag{2}$$

L'unité d'intensité de champ magnétique est donc celle du champ qui produirait l'unité de force sur l'unité de pôle magnétique.

5. Les lignes de force produites par un barreau aimanté, long et mince, s'éloignent de chaque pôle en rayonnant autour de celui-ci. Si l'on introduit en un point quelconque du champ un pôle d'intensité m, l'action exercée sur lui sera $f = m\text{H}$, H étant l'intensité du champ en ce point; cette même action est aussi représentée par $f = \frac{mm_1}{d^2}$, m_1 étant l'intensité du pôle particulier qui forme le champ et d la distance qui sépare les deux pôles ; on a donc

$$m\text{H} = \frac{mm_1}{d^2}, \quad \text{d'où} \quad \text{H} = \frac{m_1}{d^2}.$$

Ainsi l'intensité du champ en un point est mesurée par le rapport de l'intensité du pôle, qui forme le champ, au carré de la distance qui sépare ce pôle du point considéré; en d'autres termes, l'unité de champ est celle qui se rapporte au point placé à l'unité de distance de l'unité de pôle.

On dit qu'un champ magnétique est *uniforme* quand ses lignes de force sont parallèles; un champ de cette espèce ne peut être obtenu que par un groupement ou un assemblage particulier d'aimants; mais si l'on considère une portion de champ de peu d'étendue à une grande distance du pôle qui le produit, cette région sera sensiblement uniforme. Ainsi, dans une salle qui n'est pas influencée par le voisinage de pièces de fer ou d'aimants, le champ magnétique produit par la terre est sensiblement uniforme : la direction commune des lignes de force est celle que prend l'aiguille aimantée. L'aiguille aimantée est un aimant long et mince, suspendu de façon qu'il se dirige librement sous l'action de la terre, soit dans un plan horizontal, soit dans un plan vertical; pour cela, il doit étré parfaitement équilibré avant l'aimantation; autrement la pesanteur l'empêcherait d'obéir librement à la force directrice de la terre.

6. En réalité, il est impossible de se procurer un pôle unique, entièrement isolé et disjoint du pôle contraire auquel il est toujours associé dans l'aimant. Mais, de l'effet virtuel produit sur un pôle isolé dans le champ magnétique, on peut déduire l'effet réel produit sur un barreau aimanté. Dans un champ uniforme, les deux pôles d'un barreau aimanté sont soumis à deux forces parallèles, égales et de sens contraires, qui tendent à placer l'axe magnétique dans la direction des lignes de force du champ. Ce système de deux forces qui tendent à faire tourner le barreau autour de son centre, sans lui imprimer aucun mouvement de translation, constitue ce qu'on appelle en mécanique un couple. Un couple a pour mesure le produit de l'une de ses forces par la distance qui sépare leurs points d'application. Lorsque l'aimant est placé normalement aux lignes de force, le couple G, qui tend à le faire tourner pour l'amener dans leur direction, est lf, l étant la distance des pôles et f la force qui agit sur chacun d'eux; la force f est égale, d'après l'équation (2), au produit de l'intensité des pôles m de l'aimant par celle du champ

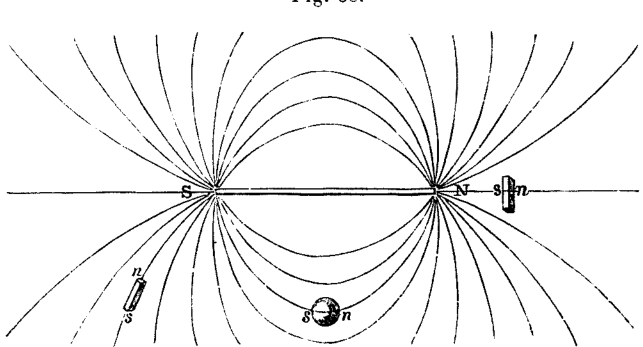
magnétique H dans lequel il se trouve. Le couple ou moment de rotation est donc

$$(3) \qquad G = ml.H.$$

Le produit ml s'appelle le *moment magnétique* de l'aimant; on déduit de l'équation (3) que le moment magnétique d'un barreau aimanté est le moment du couple qui solliciterait ce barreau, placé dans l'unité de champ, normalement aux lignes de force. *L'intensité d'aimantation* d'un aimant est le rapport de son moment magnétique à son volume, c'est-à-dire le moment magnétique sous l'unité de volume.

7. Lorsque certains corps et notamment le fer doux sont placés dans un champ magnétique, ils s'aimantent; l'axe qui joint leurs pôles a la direction même que prendrait l'axe d'un aimant d'acier placé dans la même partie du champ et libre de tourner autour de son centre. Supposez que les petits morceaux de fer doux *ns* soient aimantés par l'action de l'aimant NS, qui produit autour de N et de S les lignes de force représentées dans la *fig.* 58; le pôle nord

Fig. 58.



se développera toujours près de l'extrémité *n*, et le pôle sud à l'extrémité opposée *s*. L'aimantation obtenue de cette manière est dite *induite*, et l'action qui la produit s'appelle *induction magnétique*. L'intensité de l'aimantation est à peu près proportionnelle à l'intensité du champ, sauf dans le cas où l'aimantation est considérable.

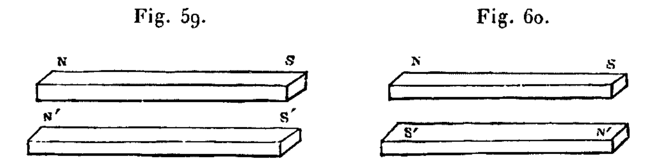
Au Chapitre III (n° 13), on a vu qu'un cylindre de fer doux, autour duquel circule un courant électrique, s'aimante; si donc nous pouvons calculer l'intensité du champ magnétique créé par le courant dans ces conditions, il nous sera facile de déterminer l'intensité de l'aimantation communiquée au cylindre de fer doux. Quand l'aimantation approche de l'intensité maximum que le fer doux est susceptible de recevoir, l'aimantation réellement acquise par le cylindre est toujours un peu inférieure à celle qu'on déduit d'un calcul fondé sur le principe de la proportionnalité.

Les corps dans lesquels la polarité magnétique a le même sens que celle du champ s'appellent *paramagnétiques*. Le fer, le cobalt, le nickel, le chrome et le manganèse sont paramagnétiques; il en est de même de plusieurs sels de fer. L'aimantation de quelques-uns de ces corps est persistante : par exemple, il est possible de se procurer un aimant de nickel, conservant ses propriétés en dehors de toute influence magnétique. Le fer est susceptible d'acquérir une aimantation beaucoup plus énergique que le nickel; mais le nickel, à ce point de vue, doit être classé immédiatement après le fer. D'autres corps, tels que le bismuth, l'antimoine et le zinc, acquièrent aussi l'aimantation, quand ils sont placés dans un champ magnétique; mais leur polarité est inverse de celle du champ; on les appelle *diamagnétiques*. Ces substances ne peuvent jamais être aimantées aussi fortement que le fer; aucune d'elles ne conserve sa polarité diamagnétique ou inverse quand on la retire du champ.

8. L'induction magnétique a pour conséquence le fait suivant : quand plusieurs aimants semblables sont disposés côte à côte, on forme un aimant, plus puissant, il est vrai, que chacun des aimants composants, mais d'une force bien inférieure à la somme des forces magnétiques des aimants employés séparément. En effet, supposons qu'un aimant NS soit placé près d'un autre aimant N′S′ de la manière indiquée dans la *fig*. 59; le pôle nord N tend à induire un pôle sud en N′, et de même N′ tend à induire un pôle sud en N; il résulte de cette action réciproque que N et N′ s'affaiblissent mutuellement, et si l'énergie de N est assez élevée au-dessus de celle de N′, il y aura même renversement de la polarité de l'aimant plus faible N′S′. Supposons en second lieu que deux aimants égaux soient placés côte à côte

de la manière indiquée dans la *fig.* 60 ; N et S′ se renforcent mutuellement par induction ; mais comme ils tendent à produire des champs

Fig. 59. Fig. 60.



magnétiques égaux et de signes contraires, l'effet de cette disposition est d'affaiblir l'intensité du champ résultant qui entoure chaque couple de pôles opposés. Si les aimants NS et S′N′ sont amenés au contact, ils produisent ensemble un champ dont l'intensité est nulle. Lorsque ces aimants ne sont pas égaux, le plus faible réduit en proportion de sa force l'intensité du champ magnétique formé par le plus fort.

9. Quand on aimante un barreau de fer doux en le plaçant dans un champ magnétique, un temps appréciable s'écoule avant qu'il atteigne l'intensité maximum d'aimantation que le champ peut produire. De même ce barreau retiré du champ ne perd pas tout de suite son aimantation ; le magnétisme décroît graduellement comme il s'était accru, et dans la plupart des cas, le fer doux, retiré du champ magnétique, conserve longtemps encore et peut-être même toujours quelques traces d'aimantation. Ce *résidu* d'aimantation est souvent désigné sous le nom de *magnétisme rémanent ;* la présence du magnétisme rémanent s'observe dans la plupart des pièces en fer doux ordinaire, surtout si elles sont de grandes dimensions ; mais il ne se manifeste qu'à un degré très faible sur certaines qualités de fer parfaitement recuit et précieuses à ce point de vue pour la construction des *instruments de télégraphie.* On appelle *force coercitive* la cause de ce phénomène. La lenteur avec laquelle une masse quelconque de fer s'aimante ou se désaimante est un obstacle sérieux dans la fabrication des appareils télégraphiques destinés à une transmission rapide. On appelle *fer doux* le fer qui perd rapidement son aimantation, c'est-à-dire celui dont la force coercitive est faible.

10. Nous avons insisté au Chapitre II sur le sens qu'il faut attacher au mot *potentiel électrique*. Le mot *potentiel magnétique* a une signification analogue. Lorsqu'on transporte un pôle magnétique, pris isolément, d'un point à un autre du champ magnétique, on reconnaît qu'il y a un travail effectué par ce pôle quand il se déplace sous l'influence et dans la direction des forces magnétiques, et qu'au contraire il y a un travail dépensé sur ce pôle quand il se déplace à l'encontre de ces forces qui agissent comme des résistances. Si le pôle considéré se meut perpendiculairement à la direction de la résultante magnétique, aucun travail n'est accompli. La *différence de potentiel magnétique* entre deux points du champ a pour mesure le travail dépensé pour déplacer l'unité de pôle de l'un de ces points à l'autre, à l'encontre des forces magnétiques qui s'opposent à son mouvement; on admet que l'unité de pôle n'exerce aucune influence sur le champ.

Un point, infiniment éloigné du pôle d'un aimant, doit être au potentiel zéro; et, par suite, le *potentiel magnétique* d'un point donné du champ a pour mesure le travail dépensé pour transporter l'unité de pôle depuis l'infini ou les limites du champ jusqu'en ce point, en admettant toujours que l'unité de pôle n'exerce aucune influence sur le champ.

On appelle *surface équipotentielle* d'un champ magnétique une surface telle que tous ses points soient au même potentiel magnétique.

En traçant une série de surfaces équipotentielles correspondant aux potentiels 1, 2, 3, ..., n, on peut décomposer un champ magnétique quelconque en diverses parties et reconnaître ainsi les propriétés dont le champ est doué en ses divers points. D'après la définition même de l'unité de différence de potentiel entre deux points, l'unité de pôle, en passant de l'une de ces surfaces à la surface voisine, à l'encontre des forces magnétiques, accomplit toujours une unité de travail.

La force magnétique en un point donné est normale à la surface équipotentielle qui passe par ce point; son intensité est en raison inverse de la longueur de la normale comprise entre deux surfaces voisines; en d'autres termes, là où cette longueur devient quatre fois plus petite, l'intensité du champ devient quatre fois plus grande.

11. Le champ magnétique peut encore être exploré à l'aide d'une autre méthode due à Faraday.

Imaginons dans un champ magnétique une ligne telle que la tangente en chacun de ses points coïncide avec la direction de la force agissant sur le pôle d'un aimant qui serait situé au point considéré. En construisant un nombre suffisant de ces lignes, on pourra assigner la *direction* de la force dans une région quelconque du champ magnétique; de plus, en les traçant suivant une certaine loi, on pourra indiquer l'*intensité* en même temps que la direction de la force en chaque point du champ. Clerk-Maxwell a démontré (1) que si, en un point quelconque de leur trajectoire, le nombre des lignes de force qui traversent l'unité de surface est proportionnel à l'intensité du champ magnétique en ce point, le même rapport subsiste entre l'intensité et le nombre de lignes de force comprises dans l'unité de surface, sur toute l'étendue de ces lignes.

Si donc on trace des lignes de force de telle façon qu'en un point quelconque de leur trajectoire le nombre de lignes, issues de l'unité de surface, soit numériquement *égal* au nombre qui mesure en ce point l'intensité du champ, cette intensité sera encore exactement représentée en tout autre point par le nombre de lignes comprises dans l'unité de surface; ainsi chaque ligne de force correspond à une force égale et constante sur tout son parcours.

Les lignes de force sont partout normales aux surfaces équipotentielles, et le nombre des lignes qui traversent un centimètre carré de chaque surface équipotentielle est en raison inverse de la longueur du segment de normale compris entre cette surface et la surface d'un ordre immédiatement inférieur : résultat déjà énoncé sous une forme un peu différente.

12. Dans un champ uniforme, les lignes de force de Faraday sont des droites parallèles et équidistantes, et les surfaces équipotentielles sont des plans perpendiculaires aux lignes de force et également distants l'un de l'autre.

(1) *Voir* le Mémoire de Maxwell sur les lignes de force de Faraday (*Cambridge Phil. Trans.*, 1857).

Si le champ magnétique est créé par un seul pôle d'intensité m, les lignes de force sont des droites, partant toutes du pôle, également réparties dans l'espace environnant et dont le nombre est $4\pi m$. Les surfaces équipotentielles sont des sphères ayant pour centre commun le pôle et pour rayons succcessifs $m, \frac{1}{2}m, \frac{1}{3}m, \ldots$.

Dans un champ produit par un système quelconque d'aimants, le tracé des lignes de force et des surfaces équipotentielles est plus compliqué.

Puisqu'un courant exerce une force sur le pôle d'un aimant placé dans son voisinage, on peut dire que ce courant produit un champ magnétique, et il est possible de construire des lignes de force et des surfaces équipotentielles qui dépendent de la forme du circuit traversé par le courant et de l'intensité de ce courant. Lorsque le fil conducteur du courant est rectiligne et de longueur indéfinie, par exemple un fil télégraphique, un pôle magnétique situé dans son voisinage est sollicité par une force qui tend à le faire tourner autour du fil; dans chaque position du pôle, cette force est perpendiculaire au plan passant par ce point et par l'axe du courant. Les surfaces équipotentielles sont donc des plans menés par l'axe du courant et également inclinés l'un sur l'autre. Si l'on appelle *unité d'intensité celle du courant, de longueur égale à l'unité, qui agit avec l'unité de force sur l'unité de pôle magnétique situé à l'unité de distance*, le nombre de plans équipotentiels menés autour du fil est $4\pi i$, i désignant l'intensité du courant. Si l'on prend i égal à 1,909, ces plans sont au nombre de 24. Lorsque πi n'est pas un nombre entier, i doit être exprimé en unités assez petites pour que l'erreur commise en prenant le nombre entier le plus voisin, soit négligeable. Les lignes de force magnétique sont des circonférences, situées dans des plans normaux à la droite que parcourt le fluide électrique, et qui ont leur centre sur cette ligne. L'intensité H de la force magnétique à une distance r du courant rectiligne est en raison inverse de la distance $\frac{r}{2i}$ qui sépare deux surfaces équipotentielles voisines; par suite, on a

$$H = \frac{2i}{r}. \tag{1}$$

13. La plupart des appareils télégraphiques se composent d'aimants ou d'armatures en fer doux mis en mouvement par des forces dues au passage de courants électriques dans des fils spécialement disposés. Ces appareils doivent être assez sensibles pour fonctionner même sous l'influence de faibles courants; il faut donc s'appliquer, dans leur construction, à disposer le fil conducteur du courant, de telle sorte que le champ magnétique créé par ce courant ait une intensité maximum; il faut aussi que le fer doux ou l'aimant, actionné par le courant, soit placé dans la partie la plus intense du champ. En procédant ainsi, et en réduisant autant que possible les résistances qui entravent le mouvement du fer doux ou de l'aimant, on donne aux appareils toute la sensibilité dont ils sont susceptibles.

Lorsque l'aimant, qui doit être mis en mouvement ou soumis à l'action du courant est de grande dimension, il occupe une étendue relativement considérable du champ magnétique, et par suite il est sollicité par une force totale plus intense que s'il était de faible dimension; mais cette force, rapportée à l'unité de volume, est rarement ou même n'est jamais aussi grande sur un aimant de grande dimension que sur un petit aimant, car un champ magnétique intense et de faible étendue exige un courant producteur beaucoup moins énergique qu'un champ de même intensité et de grande étendue. C'est pourquoi, dans tous les appareils sensibles, les parties mobiles sont de petites dimensions. L'inertie des grandes masses est aussi un grave inconvénient pour tous les organes qui doivent être animés de mouvements rapides ; car, non seulement une grande masse est sollicitée, comme on vient de le dire, par une force magnétique relativement plus faible, mais, en outre, la distance des éléments à l'axe d'oscillation augmentant à mesure que le volume s'étend, le moment d'inertie s'accroît dans un rapport encore plus grand que le volume de la masse.

De même, si l'on veut déplacer un courant, un aimant ou une armature de fer doux sous l'influence d'un aimant, il faut attribuer à cet aimant une disposition telle qu'il produise, dans la région où la pièce mobile est placée, un champ magnétique d'une intensité aussi grande que possible.

On voit que la configuration des champs magnétiques obtenus

avec les diverses formes d'aimants et les diverses dispositions des fils conducteurs des courants présente un grand intérêt pratique pour l'électricien.

14. Les pôles d'un aimant ne sont pas à ses extrémités, mais en général à une petite distance de celles-ci. Un aimant n'est pas nécessairement aimanté dans le sens de sa longueur ; ainsi un barreau peut être aimanté suivant une ligne perpendiculaire à sa longueur, c'est-à-dire transversalement, ou dans une direction quelconque. Il y a des aimants qui ont plus de deux pôles.

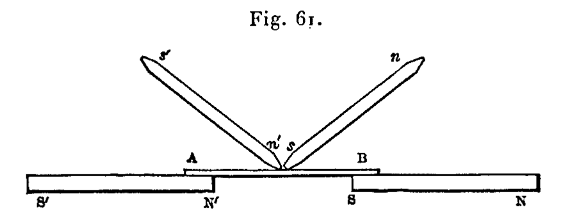
Si l'on brise un aimant long et mince, chaque fragment constitue un aimant distinct qui a son axe dans la direction de l'axe primitif; il semble résulter de ce fait que toutes les parties d'un aimant se trouvent dans un état particulier de polarisation et que les deux pôles observés dans tout aimant sont simplement le résultat de la combinaison de toutes ces parties polarisées.

Un morceau de fer doux aimanté par induction peut agir à son tour de la même manière sur un second morceau de fer doux, et ainsi de suite : ainsi un aimant soutiendra un long chapelet de clous dont chacun est suspendu à celui qui le précède. Cette chaîne de clous a ses deux pôles près des extrémités du premier et du dernier clou de la série et fournit un exemple de cet état particulier de polarisation dans lequel se trouvent toutes les parties d'un aimant; si un clou est détaché de la série, il demeure aimanté pendant quelques instants en vertu de sa force coercitive (nº 9). Lorsqu'on plonge un aimant dans la limaille de fer et qu'on le retire ensuite, les grains de limaille s'attachent surtout aux extrémités et adhèrent les uns aux autres, bout à bout, de manière à former des houppes. Ces houppes sont plus abondantes là où le champ magnétique est plus intense, c'est-à-dire près des pôles, et la direction des chapelets que forment les grains de limaille correspond à la direction des lignes de force; chaque grain de limaille devient momentanément un petit aimant.

15. On fait des aimants avec un autre aimant, en profitant de cette force coercitive, qui est surtout considérable dans l'acier fortement trempé. On peut aimanter un barreau d'acier en le frottant

une ou deux fois et toujours dans le même sens avec un aimant puissant, ou même en appuyant cet aimant contre l'une des extrémités du barreau. On obtient de meilleurs résultats par le procédé suivant : On applique sur le barreau à aimanter deux forts aimants de même intensité, en ayant soin qu'ils se touchent en son milieu par leurs pôles de nom contraire, puis on les sépare en les faisant glisser en même temps jusqu'aux extrémités du barreau. Cette opération est répétée deux ou trois fois; et le barreau étant retourné sur lui-même, on soumet sa face opposée au même traitement. Il est avantageux d'incliner un peu les deux aimants excitateurs pendant qu'on les écarte l'un de l'autre. On obtient une aimantation plus complète encore en plaçant le barreau AB entre deux aimants énergiques NS et N′S′, comme l'indique la figure, et en faisant glisser

Fig. 61.



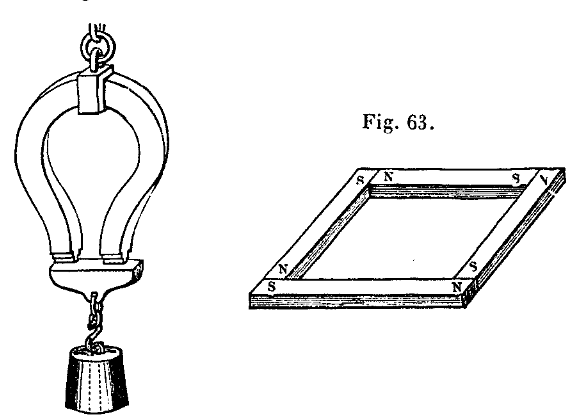
ensuite les pôles opposés de deux autres aimants du milieu de AB vers ses extrémités. Il y a d'autres procédés pour faire des aimants : tous consistent à placer chaque partie d'un barreau d'acier dans le champ magnétique le plus énergique qu'on peut obtenir; la force coercitive de l'acier intervient alors pour maintenir l'aimantation induite.

16. On donne le nom d'*électro-aimant* à un aimant formé par une tige cylindrique (ou un ensemble de tiges) en fer forgé, autour de laquelle un courant électrique circule sur une bobine de fil (*fig.* 40). Avec cette disposition, le courant produit un champ magnétique intense; les aimants les plus puissants sont obtenus par cette méthode. L'expérience apprend qu'il y a une limite à la quantité de magnétisme que peut prendre le fer doux par induction, quelle que soit la méthode employée; quand cette limite est atteinte. on dit que le fer doux est saturé de magnétisme. Cette limite de

magnétisation ou de saturation est plus rapprochée dans l'acier que dans le fer doux; l'acier se sature plus vite que le fer doux, et de même qu'il oppose à l'aimantation une résistance plus grande que le fer doux, il conserve aussi une plus forte partie du magnétisme qu'on lui a communiqué. Cette résistance à l'aimantation est encore attribuée à la force coercitive. Les électro-aimants ont des formes extrêmement variées. Les deux modèles les plus fréquemment employés sont le barreau droit, dans lequel les pôles sont aussi éloignés l'un de l'autre que possible, et le fer à cheval, dans lequel ils se trouvent rapprochés l'un de l'autre.

Fig. 62.

Fig. 63.



On appelle *armature* un morceau de fer doux qui réunit les pôles d'un aimant; l'armature adhère aux pôles et diminue considérablement, lorsqu'elle est en place, l'intensité du champ magnétique dans le voisinage. Un électro-aimant qui aurait la forme d'un anneau complet ne produirait aucun champ magnétique autour de lui; néanmoins, bien qu'il soit dépourvu de pôles, il possède certainement les propriétés d'un aimant et produit un grand nombre de phénomènes magnétiques. De même, une série d'aimants égaux, disposés (*fig.* 63) de manière que le pôle nord de chacun d'eux soit en contact avec le pôle sud de l'aimant voisin, ne produit aucun champ magnétique. On a constaté qu'une armature diminue notablement la perte d'aimantation qu'éprouvent sans cesse les aimants

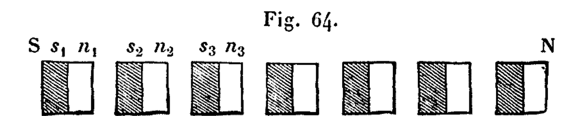
ordinaires en acier. On se sert de l'armature pour suspendre des poids aux aimants en fer à cheval (*fig.* 62).

17. Les pôles d'un long barreau de fer doux, de 1^{cmq} de section, placé horizontalement dans le champ magnétique uniforme de la Terre à Londres, acquièrent une intensité d'environ 0,175 × 32,8, ou 5,74 unités. Chacun de ces pôles attirerait un pôle égal et de nom contraire, situé à une distance de 1^{m}, avec une force f donnée par la formule

$$f = \frac{m^2}{d^2} = \frac{5,74^2}{100^2} = 32,9 \times 10^{-4},$$

soit 0,00329 unité absolue de force, ou 0^{gr},000003, l'unité absolue étant égale à environ 0^{gr},00101915. Ce résultat n'est exact, même approximativement, que si le barreau est assez long pour que l'aimantation de la partie médiane ne puisse modifier sensiblement l'action magnétique des extrémités. Il serait possible de calculer l'intensité magnétique des pôles d'un barreau quelconque, long ou petit, si l'on savait déterminer l'effet magnétique produit par une série d'éléments également aimantés et disposés à la file l'un de l'autre. Supposons (*fig.* 64) que la partie noire de chaque élément

Fig. 64.



représente un pôle sud et la partie blanche un pôle nord; si chaque élement était aimanté de façon que les parties noires et blanches, c'est-à-dire les parties aimantées en sens contraires, fussent disposées symétriquement, et si en outre l'intensité de chaque pôle était dans un rapport constant avec l'intensité du champ supposé uniforme, n_1 détruirait exactement s_2; n_2 détruirait s_3, et ainsi de suite; il ne resterait que s_1 ou S à l'une des extrémités et N à l'autre pour former les pôles actifs de l'aimant; mais en réalité l'action de chaque petit élément s'étend à tous les autres, et la résultante de tous ces effets est tellement complexe que nous devons renoncer à calculer

directement l'intensité des pôles au moyen de l'intensité d'aimantation, sauf dans certains cas très simples.

Le calcul effectué plus haut s'applique avec une exactitude suffisante à tous les barreaux longs et minces, dont la dimension transversale est très petite par rapport à la longueur. Ainsi notre barreau de 1^{cmq} de section devra avoir au moins 5^m ou 6^m de longueur pour que la formule lui soit applicable.

Le moment magnétique d'un long barreau, de section s et de longueur l, placé dans un champ uniforme d'intensité H, a pour expression

$$KHsl,$$

K étant le coefficient d'induction magnétique.

Le moment magnétique d'une sphère de même substance, placée dans le même champ, sera

$$\frac{K}{1+\frac{4}{3}\pi K} H \times \frac{4}{3}\pi r^3, \tag{5}$$

r étant le rayon de cette sphère.

Ces formules permettent de calculer l'intensité d'aimantation d'une masse donnée d'acier ou de tout autre métal magnétique, si l'on connait le coefficient K, et réciproquement de déduire K d'une mesure expérimentale du moment magnétique.

18. Le coefficient K n'est constant que pour de faibles intensités du champ magnétique; il diminue peu à peu suivant une loi inconnue lorsque l'intensité d'aimantation s'accroît et qu'on approche d'une valeur maximum, appelée *limite de magnétisation,* qui n'est pas la même pour tous les corps magnétiques. Cette limite pour le fer peut se déduire d'une expérience du docteur Joule, qui a trouvé pour l'attraction maximum qu'un électro-aimant peut exercer sur son armature le chiffre de 14061^{gr} par centimètre carré. En désignant par F cette attraction maximum, par A l'aire commune des surfaces entre lesquelles l'attraction se produit, et enfin par γ le magnétisme répandu sur l'unité de surface ou l'intensité d'aimantation, on démontre que l'on a, si la distance des surfaces est très petite,

$$F = 2\pi\gamma^2 A. \tag{6}$$

Or, 14061^{gr} représentent 14061×982, soit environ 13800000 unités absolues de force. En portant cette valeur de F dans l'équation précédente, et en supposant A égal à 1^{cmq}, on aura

$$13\,800\,000 = 2\pi\gamma^2,$$

ou

$$\gamma = \sqrt{\frac{13\,800\,000}{2\pi}} = 1490.$$

Ce chiffre représente la valeur maximum de γ pour le fer doux.

Si la valeur du coefficient K était toujours égale à 32.8, l'intensité H du champ magnétique, suffisante pour aimanter le fer doux à saturation, serait donnée par l'équation

$$32,8\,\mathrm{H} = 1490;$$

d'où

$$\mathrm{H} = \frac{1490}{32,8} = 45.$$

Il est probable que K doit seulement être considéré comme constant pour le fer lorsque l'intensité d'aimantation ne dépasse pas le quart de sa valeur maximum, soit $\frac{1490}{4}$ ou 372,5. L'intensité du champ qui produit cette aimantation est $\frac{372,5}{32,8}$ ou environ 11,2. De quelques expériences faites par Muller, il résulte que la valeur du coefficient K, dans le voisinage du point de saturation, devient à peine un tiers de la valeur maximum 32,8; en sorte que, pour produire l'effet maximum d'aimantation avec un électro-aimant, il faut lui attribuer un champ magnétique d'une intensité égale à 135.

19. Les intensités d'aimantation relatives des différents corps magnétiques placés dans le même champ n'ont pas été complètement étudiées; en d'autres termes, les valeurs de K, correspondant aux diverses valeurs de $\gamma = \mathrm{KH}$, ne sont pas bien connues dans les différents corps magnétiques. La table qui suit est déduite des valeurs relatives obtenues par Barlow; j'y ai ajouté le nickel et le cobalt d'après les valeurs relatives données par Plücker :

Fer doux forgé	32,8	Acier fondu recuit	23,3
Fonte de fer	23 »	» non recuit	16,1
Acier recuit	21,6	Nickel	15,3
Acier non recuit	17,4	Cobalt	32,8

Ces valeurs ne sont que des résultats approchés; une table complète devrait indiquer pour chacune de ces substances non pas une valeur unique, mais la série des valeurs correspondant aux diverses valeurs de γ. Or on ne connaît pas la valeur de γ à laquelle s'appliquent les nombres donnés ci-dessus. L'intensité maximum d'aimantation est moindre pour l'acier trempé que pour le fer doux, et de quelques expériences de Plücker il semble résulter que la différence est d'environ 37 pour 100; mais il faut un champ d'une intensité beaucoup plus grande pour produire l'aimantation maximum de l'acier.

Weber a trouvé que le coefficient K est 5 fois plus fort pour le nickel que pour le fer avec de faibles valeurs de γ; lorsque la valeur de γ s'élève, le coefficient du nickel décroît rapidement au-dessous de celui du fer. Il atteint un maximum pour $\gamma = 30$ environ : pour une valeur double de γ, il passe par un minimum, à partir duquel il n'augmente que d'environ 2 pour 100.

20. Ajoutons quelques mots sur les substances diamagnétiques; on peut considérer le coefficient de magnétisation K qui s'applique à ces corps comme négatif.

D'après les expériences de Plücker, le coefficient K est pour l'eau égal à

$$-10,65 \times 10^{-6}.$$

Les valeurs suivantes de K, pour les divers corps diamagnétiques, ont été calculées en partant de ce chiffre d'après les valeurs relatives obtenues par Plücker.

Eau	$-10,65 \times 10^{-6}$
Acide sulfurique (Densité : 1,839)	$-6,8 \times 10^{-6}$
Mercure	$-33,5 \times 10^{-6}$
Phosphore	$-18,3 \times 10^{-6}$
Bismuth	$-250,0 \times 10^{-6}$

D'une expérience de Weber il résulte que le coefficient K pour le bismuth est environ

$$-16,4 \times 10^{-6}.$$

Ces tableaux donneront une idée générale des valeurs relatives

des actions paramagnétiques et diamagnétiques; on ne peut regarder ces nombres ni comme exacts ni même comme approchés. Divers observateurs ont attribué au nombre K pour la même substance des valeurs qui diffèrent entre elles de 20 unités. Il faut se rappeler que les coefficients précédents se rapportent à des volumes égaux et non à des poids égaux des diverses substances.

21. Il résulte de l'équation (6) que l'attraction entre un aimant et son armature est proportionnelle au carré de l'intensité de l'aimantation, et, par suite, s'il s'agit d'un électro-aimant, proportionnelle au carré du produit Ki, i étant l'intensité du courant.

Il résulte encore de l'équation (6) que, si l'intensité de l'aimantation est la même dans toute la masse de fer, l'attraction est simplement proportionnelle à la section transversale du noyau. On augmente la longueur de l'électro-aimant droit dans le but d'obtenir un champ uniforme en disposant les pôles de façon que l'un ne trouble pas l'action de l'autre.

En arrondissant ou en terminant en pointe les extrémités d'un aimant, on produit une aimantation plus énergique aux extrémités que sur les autres points, et, par suite, une attraction plus grande par centimètre carré de surface.

L'attraction entre un aimant et son armature serait simplement proportionnelle à l'intensité du magnétisme induit dans l'armature, si celle-ci, par l'étendue de sa masse ou l'énergie de son aimantation, ne réagissait pas sur l'aimant lui-même en modifiant son intensité. Les forces d'attraction relatives exercées par un aimant de grande largeur sur diverses substances, prises sous de petits volumes, fournissent donc les valeurs relatives de K pour ces substances, pourvu que les volumes soient les mêmes et que l'intensité du champ magnétique soit la même dans la portion de l'espace occupée par le corps soumis à l'expérience; mais on a vu que ces coefficients K ne sont à peu près d'aucune utilité, à moins qu'on ne connaisse aussi les valeurs correspondantes de γ.

CHAPITRE VII.

MESURES MAGNÉTIQUES.

1. Avant d'aborder l'étude des lois relatives à l'action des courants sur les courants, il convient d'exposer les méthodes imaginées pour mesurer les forces qui se produisent entre les aimants et exprimer leurs valeurs en nombres qui dépendent uniquement des trois unités fondamentales : centimètre, gramme, seconde. Pour y parvenir, il suffit de mesurer deux grandeurs : 1° l'intensité H, en un point quelconque du champ magnétique produit par un aimant ou un groupement d'aimants déterminé; 2° le moment magnétique $M = ml$ de l'aimant placé dans ce champ et soumis à son action. Connaissant ces deux quantités, on pourra calculer le couple qui sollicite l'aimant, car ce couple a pour mesure $G = ml\mathrm{H}$. Pour se placer dans les conditions d'expérience les plus simples, il faut que le champ dont on se propose de déterminer l'intensité soit sensiblement uniforme dans toute l'étendue de l'espace où l'expérience doit être réalisée. Le champ magnétique produit par la terre est sensiblement uniforme dans cette étendue restreinte : c'est celui que nous choisirons. Nous allons d'abord donner une description générale du champ magnétique dû au magnétisme terrestre, et nous examinerons ensuite comment on mesure l'intensité de ce champ.

2. La direction des lignes de force du champ terrestre n'est pas horizontale, sauf en certains lieux voisins de l'équateur. On peut,

en effet, comparer la terre à un gros barreau aimanté, et à l'inspection de la *fig.* 58 on voit que les lignes de force ne sont parallèles à l'axe de l'aimant qu'aux seuls points également distants des deux pôles. L'inclinaison des lignes de force sur le plan de l'horizon en un lieu donné s'appelle l'*inclinaison magnétique* en ce lieu. Si un aimant est suspendu librement par son centre de gravité, il ne reste pas horizontal; son axe se place dans la direction même des lignes de force. Dans l'hémisphère nord, le pôle nord plonge au-dessous de l'horizon, et l'angle que fait l'axe magnétique avec sa projection sur le plan horizontal mesure précisément l'inclinaison.

Les lignes de force du champ magnétique de la Terre ne sont pas, en général, situées dans des plans exactement dirigés du Nord vers le Sud. Le plan vertical qui contient la force terrestre en un lieu donné s'appelle le *méridien magnétique* de ce lieu; l'aiguille aimantée marque le *nord magnétique*. Le nord magnétique n'est pas un point unique et déterminé; car les méridiens magnétiques aux divers lieux de la terre ne se coupent pas tous en un même point de sa surface, comme il arrive pour les méridiens géographiques.

Le méridien géographique d'un lieu est le plan passant par ce lieu et par l'axe de la Terre. La *déclinaison* est l'angle, horizontal ou azimutal, que fait le méridien magnétique avec le méridien géographique: la déclinaison est *orientale* lorsque le pôle d'un aimant libre se place à l'est du méridien géographique qui passe par son milieu; elle est *occidentale* si ce pôle nord est à l'ouest de ce méridien. Les extrémités nord et sud d'une boussole indiquent la trace horizontale du méridien magnétique.

3. La déclinaison et l'inclinaison varient non seulement d'un point à un autre, mais encore en un même point d'un jour à l'autre et d'une heure à la suivante. Certaines variations sont irrégulières, mais d'autres sont évidemment périodiques.

1° Il y a des variations de déclinaison séculaires dont la période n'est pas exactement connue. En 1580, la déclinaison était à Paris de 11°30′ E.; en 1814, elle était au même endroit de 22°34′ O. Depuis cette époque, l'aiguille n'a pas cessé de retourner vers l'Est; en 1865, la déclinaison était de 18°44′ O. En 1880, elle était de 19°30′ O.

2° Il y a aussi des variations annuelles de déclinaison; celles-ci ne dépassent pas 15′ ou 18′, et elles diffèrent suivant les saisons.

3° Il y a de même des variations diurnes de déclinaison qui à Paris s'élèvent pour certains jours à environ 25′ et pour d'autres ne dépassent pas 5′.

4° Enfin il y a des variations ou perturbations accidentelles qu'on attribue aux *orages magnétiques*. Ces variations se manifestent avec une grande rapidité; elles produisent sur la boussole des déviations brusques à droite et à gauche, tout à fait comparables aux signaux télégraphiques ordinaires pour leur durée et leur mode de succession.

En certains points de la Terre, les méridiens magnétique et géographique coïncident; on peut réunir ces points par une ligne imaginaire qu'on appelle *ligne agonique* ou sans déclinaison. L'inclinaison varie aussi d'un point à un autre; à Paris, elle est de 66°; elle augmente à mesure qu'on s'élève dans les régions polaires et atteint 90° au pôle magnétique. Sur une série de points voisins de l'équateur il n'y a pas d'inclinaison; la ligne qui joint ces points s'appelle l'*équateur magnétique*. Dans l'hémisphère sud, le sens de l'inclinaison est renversé; c'est le pôle sud qui plonge au-dessous de l'horizon. En réunissant par une courbe les points où l'inclinaison est la même, on obtient les lignes *isocliniques*.

4. On appelle *intensité totale du magnétisme terrestre* l'intensité du champ magnétique mesurée dans la direction même des lignes de force au lieu d'observation.

On parviendrait difficilement à effectuer la mesure directe de l'intensité sur la ligne de force, surtout à cause de la variation trop fréquente que subit cette direction. Il vaut mieux déterminer expérimentalement d'une part l'*intensité* de la composante horizontale et, d'autre part, la *direction* de la force totale. Ces deux éléments donnent l'intensité magnétique totale; en effet, soient H la composante horizontale, R l'intensité totale et θ l'angle d'inclinaison (*fig.* 65); on a

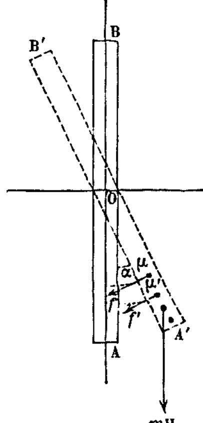
Fig. 65.

$$R = \frac{H}{\cos\theta}. \tag{1}$$

5. Il est indispensable de connaître le moment magnétique $M = ml$ d'un aimant quand on veut déterminer son action sur un autre aimant ou sur un circuit électrique. Or, il suffit de deux expériences pour obtenir le moment magnétique M et la composante horizontale H du champ terrestre. La première expérience donne la valeur du produit MH par une observation de la force directrice que la terre exerce sur l'aimant; la seconde expérience donne le rapport $\frac{M}{H}$ par la comparaison des intensités relatives des champs magnétiques produits par l'aimant et par la Terre. Nous allons décrire ces deux expériences.

1° Supposons que l'aimant soit suspendu de manière à osciller librement dans un plan horizontal autour de son centre de gravité et à n'obéir ainsi qu'à l'action directrice de la composante horizontale de la Terre. Soit I le moment d'inertie de l'aimant par rapport à l'axe autour duquel il se meut. Cette quantité est aisée à calculer quand l'aimant a une forme géométrique régulière; d'ailleurs, elle peut être déterminée directement par l'expérience. On laisse l'aimant osciller librement pendant un certain temps; en désignant par n le nombre des oscillations simples exécutées en une seconde, on a la formule

Fig. 66.



$$(2) \qquad MH = \pi^2 n^2 I.$$

Démonstration. — Les oscillations du barreau aimanté sont assimilables à celles que le pendule ordinaire exécute de part et d'autre de la verticale; car, dans les deux cas, la force qui produit le mouvement est, à chaque instant, proportionnelle à l'angle qui sépare le mobile de sa position d'équilibre. On conçoit dès lors qu'il y ait une relation simple entre la durée de l'oscillation et l'intensité de la force directrice. On peut établir cette relation par quelques considérations élémentaires.

Le mouvement oscillatoire du barreau peut être reproduit en substituant à l'action de la force terrestre mH les actions simultanées d'une série d'autres forces, qui, appliquées respectivement à

chacun des éléments $\mu, \mu', \ldots$ du barreau et dans la direction qu'ils tendent à suivre, leur imprimeraient à chaque instant l'accélération qu'ils reçoivent réellement dans le mouvement commun. Or, chacune de ces forces doit être proportionnelle à la masse μ de l'élément et à la distance r de cet élément à l'axe de mouvement; si en effet cette condition n'était pas satisfaite, la vitesse angulaire imprimée aux différents éléments ne serait pas la même. Puis, comme toutes les forces élémentaires $f, f', \ldots$, prises ensemble, doivent équivaloir au couple terrestre, il faut que, si l'on renverse leurs directions, elles puissent neutraliser complètement l'action de ce dernier. En d'autres termes, il faut que la somme de leurs moments, pris par rapport à l'axe de mouvement, soit égale au moment du couple terrestre, pris par rapport au même axe.

Soient MH le moment du couple terrestre quand l'axe magnétique est normal aux lignes de force, et α l'angle formé par le méridien magnétique avec l'axe polaire; le moment du couple horizontal dans la position A′B′ du barreau sera

$$\text{MH} \sin\alpha, \quad \text{ou plus simplement} \quad \text{MH}.\alpha,$$

puisqu'il s'agit de très petits angles.

Les moments des forces cherchées sont respectivement

$$\text{K}.\mu r^2, \ \text{K}.\mu' r'^2, \ \ldots,$$

puisqu'elles sont dirigées suivant la tangente à l'axe que décrit l'élément. Donc on devra avoir la relation

$$\text{MH}.\alpha = \text{K}(\mu r^2 + \mu' r'^2 \ldots);$$

d'où

$$\text{K} = \alpha \frac{\text{MH}}{\mu r^2 + \mu' r'^2 + \ldots} = \alpha \frac{\text{MH}}{\text{I}}.$$

Ainsi chaque élément μ du barreau se meut comme s'il était soumis à l'action d'une force

$$\mu \frac{\text{MH}}{\text{I}} r\alpha$$

proportionnelle à la distance r de cet élément au centre de mouvement et à l'écart angulaire α qui le sépare de sa position d'équilibre.

En un mot, il est dans les conditions identiques à celles où se trouverait un pendule simple, de masse μ et de longueur r, si l'intensité de l'action de la pesanteur sur l'unité de masse, au lieu d'être g, avait pour valeur $\frac{MHr}{I}$. Par suite, le temps de l'oscillation de cet élément μ sera donné par l'équation

$$t = \varpi \sqrt{\frac{r}{\frac{MHr}{I}}} = \pi \sqrt{\frac{I}{MH}}.$$

Actuellement, soit n le nombre des oscillations exécutées dans l'unité de temps ; on a

$$t = \frac{1}{n} = \pi \sqrt{\frac{I}{MH}};$$

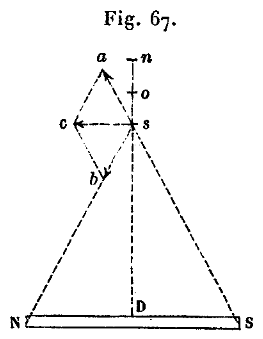
d'où enfin

(2) $$MH = \pi^2 n^2 I.$$

C. Q. F. D.

2° Pour obtenir le rapport $\frac{M}{H}$, on place l'aimant NS perpendiculairement au méridien magnétique, et l'on dispose à une certaine distance un petit aimant ns, mobile autour de son centre o, dont l'axe prolongé dans le méridien partage en deux parties égales l'angle NoS (*fig.* 67). L'aimant ns est soumis aux actions des pôles

Fig. 67.



fixes N et S qui tendent à le faire tourner : la déviation θ dépend des intensités relatives du champ terrestre et du champ produit

par l'aimant NS. Posons $o\mathrm{D} = \mathrm{R}$, on trouve

$$\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{H}} = \mathrm{R}^3 \operatorname{tang}\theta. \tag{3}$$

Démonstration. — Soient λ la demi-longueur du barreau NS, λ' la demi-longueur du barreau *ns*, *m* l'intensité des pôles du barreau fixe, μ celle du barreau mobile. Le pôle sud S agissant sur le pôle sud *s* produit une force répulsive *sa* égale à $\frac{m\mu}{d^2}$, en appelant *d* la distance S*s*. De même le pôle nord N produit sur le pôle sud *s* une attraction *sb* égale à $\frac{m\mu}{d^2}$. Si l'on compose ces deux forces, on obtient une résultante $\mathrm{F} = sc$, qui représente en grandeur et en direction, au point *s*, l'intensité du champ magnétique produit par le barreau fixe. Les deux triangles *cbs* et N*s*S sont semblables et donnent la relation

$$\mathrm{F} = 2\lambda\,\frac{sb}{d} = \frac{2m\lambda\mu}{d^3} = \frac{\mathrm{M}\mu}{d^3}.$$

L'action des deux pôles N et S sur le pôle *n* du barreau mobile produira de même une résultante F' perpendiculaire à *ns*, dirigée en sens contraire de F et égale à $\frac{\mathrm{M}\mu}{d'^3}$, d' étant la distance S*n*. En remplaçant *d* et d' par leurs valeurs en fonction de R, λ, λ', on aura pour l'action sur *s*

$$\mathrm{F} = \frac{\mathrm{M}\mu}{[(\mathrm{R}-\lambda')^2+\lambda^2]^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mathrm{M}\mu}{\mathrm{R}^3\left[\left(1-\frac{\lambda'}{\mathrm{R}}\right)^2+\left(\frac{\lambda}{\mathrm{R}}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}$$

et pour l'action sur *n*

$$\mathrm{F}' = \frac{\mathrm{M}\mu}{[(\mathrm{R}+\lambda')^2+\lambda^2]^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mathrm{M}\mu}{\mathrm{R}^3\left[\left(1+\frac{\lambda'}{\mathrm{R}}\right)^2+\left(\frac{\lambda}{\mathrm{R}}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}.$$

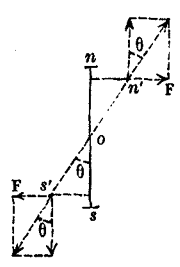
Si l'on suppose R assez grand pour que les rapports $\frac{\lambda'}{\mathrm{R}}$ et $\frac{\lambda}{\mathrm{R}}$ puissent être négligés, on trouve pour le couple résultant, dû à l'action

du barreau NS sur le barreau *ns*,

$$\frac{2\lambda'\mu M}{R^3} = \frac{M_1 M}{R^3},$$

M_1 désignant le moment magnétique du petit aimant. L'aiguille mobile est déviée de l'angle θ (*fig.* 68) et prend une position d'équi-

Fig. 68.



libre sous l'action de ce couple et celle de la Terre. Le moment de rotation dû à l'action de la Terre, pour la déviation θ, est

$$M_1 H \sin\theta.$$

Le moment dû à l'action de l'aimant NS est

$$\frac{M_1 M \cos\theta}{R^3};$$

dans la situation d'équilibre, ces moments doivent être égaux, ce qui conduit à l'expression

$$\frac{M}{H} = R^3 \operatorname{tang}\theta,$$

qu'il s'agissait de démontrer.

Des équations (2) et (3) on déduit tour à tour H et M; on a

(4) $$H = \pi . n \sqrt{\frac{I}{R^3 \operatorname{tang}\theta}},$$

et

(5) $$M = \pi . n \sqrt{I . R^3 . \operatorname{tang}\theta}.$$

6. Lorsqu'on connaît d'avance la valeur exacte du magnétisme terrestre, une seule expérience suffit pour déterminer le moment magnétique d'un aimant temporaire ou permanent; car de l'équation (3) on tire

$$M = R^3 H \tang\theta.$$

Sur toute l'étendue de l'Angleterre, H a une valeur assez constante pendant plusieurs années consécutives pour que la valeur de M ainsi obtenue ait une exactitude suffisante dans les usages pratiques. On peut appliquer cette méthode aux aimants en fer à cheval ou en général aux aimants de forme quelconque si l'on a soin de fixer NS de façon que son axe soit exactement perpendiculaire au méridien magnétique; à cet effet, on suspend l'aimant par son centre de figure et on lui laisse prendre sa position d'équilibre dans le plan méridien : on marque cette position, puis on tourne l'aimant d'un angle exactement égal à 90° et on le fixe.

7. Pour que les valeurs fournies par les formules précédentes soient exprimées en unités absolues, dérivées des unités fondamentales adoptées jusqu'ici, il faut avoir soin de mesurer le moment d'inertie I dans le système C. G. S., c'est-à-dire de mesurer la masse en grammes et le rayon de gyration en centimètres. Par exemple, prenons un prisme rectangulaire en acier, ayant pour base un carré de $0^{cm},2$ de côté et pour longueur 2^{cm}, et par conséquent pesant $0^{gr},624$. Le moment d'inertie du barreau, pris par rapport à la verticale passant par son centre de figure, est donné par la formule connue

$$I = M.\frac{a^2+b^2}{3},$$

dans laquelle $a = 1^{cm}$ et $b = 0^{cm},1$; $\frac{a^2+b^2}{3}$ représente le carré du rayon de gyration. On trouve $I = 0,21008$.

Pour convertir en grammes la valeur de H déduite des formules précédentes, il faut la diviser par la valeur de g en centimètres, c'est-à-dire, à Paris, par $980^{cm},858$, et à Glascow par $981^{cm},4$. La moyenne de la composante horizontale H a été en Angleterre, pour 1862, de 0,175 unité absolue de force dans le système C. G. S.; ce

qui signifie que sous l'action d'une force égale à la composante horizontale du magnétisme actuel de la Terre, une masse du poids de 1^{gr} acquerrait au bout de une seconde une vitesse de $0^{cm},175$.

8. Le moment d'inertie I pour un aimant donné ou toute autre masse de forme simple, mobile autour d'un axe de suspension, peut, comme nous l'avons dit, se calculer quand on connaît les dimensions du barreau et le poids spécifique de la matière dont il est composé; mais si la forme du corps est compliquée ou la masse hétérogène, il vaut mieux déterminer I expérimentalement et par comparaison avec un autre corps dont le moment d'inertie est connu. A cet effet, on observe d'abord la durée t d'une oscillation simple de l'aimant soumis à la seule force directrice de la Terre, ce qui donne

$$t = \pi\sqrt{\frac{I}{MH}}.$$

Puis on place sur le barreau, à même distance de l'axe, deux poids égaux dont le moment d'inertie I_1 est connu, et l'on observe le temps t_1 que le système ainsi formé emploie pour faire une oscillation simple. Le moment d'inertie sera maintenant $I + I_1$, et l'on aura la formule

$$t_1 = \pi\sqrt{\frac{I + I_1}{MH}}.$$

Élevons au carré ces deux équations et divisons; il viendra

$$\frac{t^2}{t_1^2} = \frac{I}{I + I_1};$$

d'où

$$(6) \qquad I = \frac{I_1}{t_1^2 - t^2}\,t^2.$$

On obtient les temps t et t_1 en comptant les nombres n et n_1 d'oscillations effectuées en une seconde, $t = \frac{1}{n}$, $t_1 = \frac{1}{n_1}$.

La méthode qui a servi à calculer au numéro 5 la valeur de la force F, représentée par la ligne *cs* de la *fig.* 67, permet de déterminer l'intensité du champ produit par un aimant en un point quelconque,

pourvu que l'on connaisse le moment magnétique M de cet aimant et sa longueur 2λ. En effet, l'action de chacun des pôles de cet aimant sur une unité de pôle, placée à la distance d, sera toujours

$$\frac{m}{d^2} = \frac{M}{2\lambda d^2};$$

par suite, en composant les forces dues à chaque pôle on obtient la résultante, c'est-à-dire la direction des lignes de force et l'intensité du champ.

On obtient aussi les valeurs relatives des moments magnétiques de deux aimants, dont les moments d'inertie I et I_1 sont connus, en les faisant osciller dans le même champ magnétique et en observant la durée t et t_1 d'une oscillation simple. Il suit en effet de l'équation (2) que, si l'on suppose H constant,

$$(7) \qquad \frac{M}{M_1} = \frac{I}{I_1} \cdot \frac{t_1^2}{t^2}.$$

De même on peut faire la comparaison des intensités horizontales de deux champs magnétiques, en faisant osciller le même aimant successivement dans les deux champs et observant la durée t ou t_1 d'une oscillation correspondante; car la même équation (2), si l'on suppose M constant, donne, I et I_1 étant les mêmes,

$$(8) \qquad \frac{H}{H_1} = \frac{t_1^2}{t^2}.$$

Quand on fait cette expérience, on ne doit pas compter sur la constance d'un aimant donné, même d'un jour au lendemain.

9. En calculant les effets d'un aimant, il ne faut jamais oublier que, bien qu'on puisse déterminer expérimentalement la valeur du produit ml, il est impossible d'obtenir séparément m; car on ne sait jamais si la longueur l, c'est-à-dire la distance des deux pôles, est égale à la longueur réelle de l'aimant, et quelle est la différence de ces deux grandeurs. Si l'aimant soumis à l'expérience était aimanté uniformément, c'est-à-dire capable de fournir des aimants identiques quand on le brise en fragments égaux, la lon-

gueur l serait exactement la longueur même de l'aimant. Mais dans les aimants, tels que nous savons les produire, l'intensité de magnétisation éprouve une diminution sensible aux extrémités mêmes, ce qui rend l plus petit que la longueur géométrique de l'aimant. Ajoutons que le champ magnétique, dû à un circuit traversé par le flux électrique, diffère sous plusieurs rapports de celui que produisent les pôles d'un aimant.

CHAPITRE VIII.

MESURES ÉLECTROMAGNÉTIQUES. ACTION DES COURANTS SUR LES COURANTS ET LES AIMANTS.

1. Le système d'unités exposé au Chapitre V suffirait pour toutes les recherches électriques; toutefois, ce système n'est pas parfaitement approprié au calcul de l'effet des courants électriques sur d'autres courants ou sur des aimants.

Les unités électrostatiques ont été déduites d'une série d'équations où n'entrent point les forces réciproques entre les courants et les aimants. En partant de la mesure de ces dernières forces on obtient un nouveau système d'unités appelées *unités électromagnétiques*, et définies d'après une série d'équations qui ne renferment pas les forces de répulsion ou d'attraction électrostatique. Les unités électromagnétiques sont plus fréquemment employées en télégraphie que les unités électrostatiques. Au Chapitre VI (n° 12), se trouve déjà une définition de l'unité d'intensité de courant basée sur la force avec laquelle un courant agit sur un pôle magnétique. Suivant cette définition, l'unité d'intensité est celle d'un courant qui, par chaque centimètre de son circuit, produirait l'unité de force sur l'unité de pôle magnétique placé à l'unité de distance de toutes les parties du circuit. Pour réaliser cette dernière condition, on donne au fil conducteur du courant la forme d'une circonférence dont le centre est occupé par le pôle magnétique librement suspendu. La force f

exercée par un courant sur le pôle d'un aimant placé dans son voisinage est proportionnelle à l'intensité magnétique m de ce pôle et à l'intensité I du courant. Si le conducteur a tous ses points à la même distance du pôle, cette force est aussi proportionnelle à la longueur L du conducteur. Enfin elle est en raison inverse du carré de la distance d qui sépare le pôle du conducteur; comme elle est indépendante de tout autre élément, on peut écrire

$$f = \frac{\mathrm{IL}m}{d^2}; \tag{1}$$

on tire de l'équation (1)

$$\mathrm{I} = \frac{fd^2}{\mathrm{L}m}.$$

Cette dernière équation conduit à la définition, énoncée tout à l'heure, de l'unité d'intensité; car en faisant

$$f = 1,\ m = 1,\ d = 1,\ \mathrm{L} = 1,$$

on a

$$\mathrm{I} = 1.$$

2. Employons les lettres majuscules Q, E, R, I, C pour indiquer en mesures électromagnétiques les quantités que nous avons précédemment représentées en mesures électrostatiques par les lettres q, e, r, i, c. Entre ces diverses quantités existent les relations suivantes :

$$\mathrm{Q} = \mathrm{I}t,\ \mathrm{E} = \frac{w}{\mathrm{Q}},\ \mathrm{R} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{I}},\ \mathrm{C} = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{E}},$$

où t exprime la durée du courant et w le travail effectué; en adoptant l'unité d'intensité de courant donnée par la formule (1), on peut déduire de ces quatre équations une nouvelle série complète d'unités qui sont dans un rapport défini avec les unités électrostatiques.

On a trouvé par l'expérience que l'unité électrostatique d'intensité est égale à 28800000000 d'unités électromagnétiques d'intensité de courant, en sorte que, ce coefficient numérique étant désigné par v, on a

$$i = v\mathrm{I}.$$

Les relations précédentes se transforment et deviennent

$$Q = \frac{i}{v} t = \frac{q}{v}, \quad E = \frac{w}{q} v = ev,$$

$$R = \frac{ev^2}{i} = rv^2, \quad C = \frac{q}{ev^2} = \frac{c}{v^2}.$$

Telles sont les relations qui existent entre les nombres représentant une même grandeur électrique dans les deux systèmes d'unités; toutes dérivent immédiatement des équations fondamentales. Les relations qui lient les unités électromagnétiques entre elles et avec les unités mécaniques peuvent être résumées ainsi :

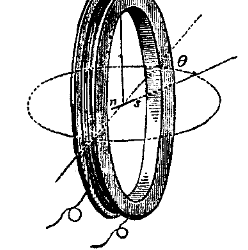
L'unité d'intensité de courant transporte en une seconde une unité de quantité d'électricité à travers une section quelconque du circuit.

L'unité d'intensité de courant est produite par l'unité de force électromotrice dans un circuit d'une unité de résistance.

L'unité d'intensité de courant qui traverse en une seconde un conducteur d'une unité de résistance produit un effet mécanique équivalent à l'unité de travail.

Enfin l'unité d'intensité de courant, traversant un conducteur d'une unité de longueur, exerce l'unité de force sur une unité de pôle magnétique située à l'unité de distance. C'est cette dernière condition qui caractérise le système des unités électromagnétiques.

Fig. 69.



3. Supposons qu'un aimant *ns* très petit, de $0^m,006$ de longueur, par exemple, soit suspendu librement au centre d'une bobine circulaire (*fig.* 69), dont le diamètre est très grand par rapport à la longueur de l'aimant, et égal, par exemple, à $0^m,45$; le plan de la bobine est placé dans le méridien magnétique. Si un courant traverse la bobine et fait dévier l'aiguille d'un angle θ, la valeur de l'intensité I de ce courant en mesure électromagnétique est donnée par la formule

$$(2) \qquad I = \frac{H\,d^2}{L} \tang\theta,$$

H étant la composante horizontale du magnétisme terrestre, L la longueur du fil enroulé sur le cadre circulaire dont le rayon est d. Ces deux longueurs doivent être exprimées en centimètres, si H est estimé en unités absolues de force du système C. G. S.

L'équation (2) indique que l'intensité du courant est proportionnelle à la tangente de l'angle de déviation; de là le nom de *galvanomètre* ou *boussole des tangentes,* donné à l'instrument ainsi construit.

En outre, si l'on connaît la valeur exacte de la composante terrestre H, on pourra, à l'aide d'une boussole des tangentes, évaluer directement l'intensité d'un courant en unités électromagnétiques absolues, sans qu'on ait besoin de connaître le moment magnétique de l'aiguille, et quelles que soient les dimensions ou certaines particularités présentées par l'instrument. L'intensité d'un courant mesurée en Australie pourra donc être immédiatement comparée à l'intensité d'un autre courant mesurée en Angleterre.

Établissons la formule (2). La force électromagnétique f, exercée par un courant d'intensité I sur l'unité de pôle magnétique placé au centre d'une bobine circulaire de rayon d est, d'après l'équation (1),

$$f = \frac{\mathrm{IL}}{d^2}.$$

Supposons un petit aimant, suspendu au centre de la bobine, avec son axe magnétique parallèle au plan du cadre. Le courant développe sur les deux pôles deux forces égales et de direction contraire, qui sont normales au plan du cadre, et dont l'expression est

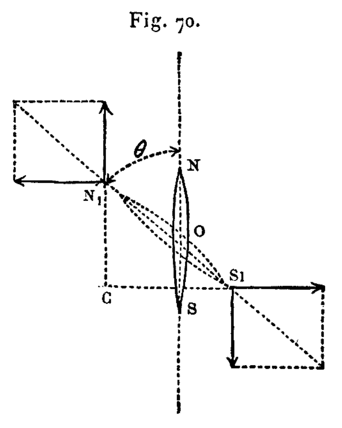
$$fm = \frac{\mathrm{IL}m}{d^2},$$

m étant l'intensité de chacun des pôles de l'aimant. Si l est la distance qui sépare les pôles ou les points d'application de ces forces, distance sensiblement égale à la longueur de l'aimant, ce dernier est sollicité par un couple dont le moment est

$$fml = \frac{\mathrm{IL}ml}{d^2}. \tag{1'}$$

Soient (*fig.* 70) NS la position normale de l'aimant, c'est-à-dire la direction du méridien magnétique qui se confond avec la projection du cadre, et N_1S_1 la nouvelle position que prend l'aimant sous l'influence du courant : N_1S_1 fait avec NS un angle θ.

Fig. 70.



Dans ces conditions, si l'on admet que l'aiguille aimantée soit très petite par rapport aux dimensions du cadre, les pôles demeurent sensiblement au centre de la bobine; la force f ne change pas, mais le bras de levier du couple *électromagnétique*, représenté par N_1C sur la *fig.* 70, est maintenant égal à $l\cos\theta$; par suite, le moment du couple est

$$\frac{\mathrm{IL}ml}{d^2}\cos\theta.$$

Ce couple agit en sens contraire du couple dû à l'action directrice de la Terre. Soit H la composante horizontale du magnétisme terrestre au lieu d'observation; la force exercée par la Terre sur chaque pôle est $\mathrm{H}m$, et le bras de levier du couple terrestre CS_1, c'est-à-dire la perpendiculaire commune aux deux forces, est $l\sin\theta$. Le couple terrestre a donc pour expression $\mathrm{H}ml\sin\theta$. Dans la situation d'équilibre, ces deux couples doivent être égaux, ce qui conduit à l'équation

$$\frac{\mathrm{IL}ml}{d^2}\cos\theta = \mathrm{H}ml\sin\theta;$$

d'où

$$\mathrm{I} = \frac{\mathrm{H}d^2}{\mathrm{L}}\operatorname{tang}\theta.$$

4. Les actions réciproques, qui s'exercent entre des courants de formes et d'intensités quelconques, peuvent toutes se déduire mathé-

matiquement d'un certain nombre de principes établis par Ampère.

1° La force avec laquelle deux éléments de courant agissent l'un sur l'autre est dirigée suivant la ligne qui joint les milieux de ces éléments, et de plus elle est inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare.

2° Soient (*fig.* 71) deux fils de longueur très petite, mn, m_1n_1, parallèles l'un à l'autre et perpendiculaires à la ligne qui joint leurs centres; ils sont parcourus, le premier par un courant d'intensité i, et le second par un courant d'intensité i_1. Ces deux éléments de courant s'attirent ou se repoussent mutuellement suivant qu'ils sont

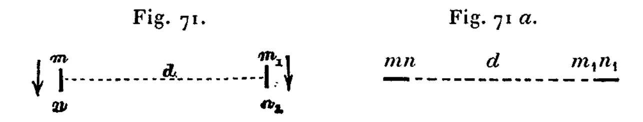


Fig. 71. Fig. 71 *a*.

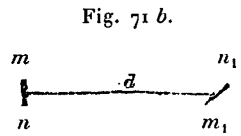
dirigés dans le même sens ou en sens contraire, et, dans les deux cas, la force attractive ou répulsive a pour expression

$$\frac{i \times i_1 \times mn \times m_1 n_1}{d^2}.$$

3° Si ces deux éléments de courant ont la position indiquée dans la *fig.* 71 *a*, c'est-à-dire sont alignés suivant la droite d qui joint leurs centres, la force qu'ils exercent l'un sur l'autre a la même direction que dans le cas précédent; mais elle est moitié moindre en grandeur. Elle est répulsive si les courants sont de même sens, et attractive s'ils sont de sens contraire.

4° Si les deux éléments de courant mn et m_1n_1, étant tous deux perpendiculaires à la ligne d, sont aussi perpendiculaires l'un à l'autre (*fig.* 71 *b*), il n'y a ni attraction ni répulsion entre les courants; leur action mutuelle est nulle.

Fig. 71 *b*.

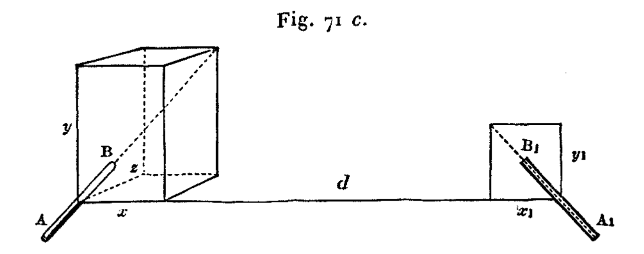


5° Si l'un des éléments est aligné suivant d, tandis que l'autre est

perpendiculaire à cette droite, il n'y a encore ni attraction ni répulsion mutuelles.

6° Considérons maintenant (*fig.* 71 *c*) deux éléments de courant

Fig. 71 *c*.



dans une position quelconque; soient AB et A_1B_1 leurs longueurs, i et i_1 leurs intensités; menons la ligne d qui joint leurs milieux. Nous pouvons remplacer l'élément A_1B_1 par ses deux composantes x_1 et y_1, suivant la droite d et une perpendiculaire à cette droite dans le plan A_1B_1d. Nous pouvons aussi décomposer l'élément AB en trois composantes rectangulaires, l'une x suivant la droite d, la deuxième y parallèle à y_1, et la troisième perpendiculaire aux deux autres.

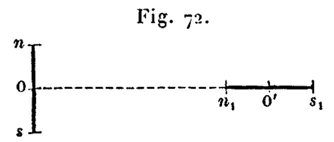
L'action mutuelle des deux éléments AB, A_1B_1 sera la somme des actions exercées par chacun des deux éléments x_1 et y_1 sur chacun des trois éléments x, y, z. Or, cette somme se réduit à l'action de y sur y_1 et à l'action de x sur x_1, lesquelles peuvent se calculer d'après les principes 2 et 3. En effet, les quatre autres actions, c'est-à-dire celles de x_1 sur y et z et celles de y_1 sur x et z sont nulles. Lorsqu'il s'agit de courants de longueur quelconque, il faut estimer l'action de chacun des éléments du circuit sur tous les éléments de l'autre et faire la somme des résultats obtenus. Cette sommation ou intégration conduit aux formules développées dans les paragraphes suivants.

L'expérience confirme ces résultats sur des circuits fermés et établit ainsi la vérité de la théorie d'Ampère dans son application aux circuits de cette nature.

On déduit de la théorie d'Ampère que l'action exercée à distance par un circuit fermé de petite dimension est équivalente à celle d'un aimant très court, dont l'axe est normal au plan du cir-

cuit et dont le moment magnétique est égal au produit de l'intensité i du courant par la surface du circuit. Si, par exemple, le circuit est un cercle de rayon k, le moment magnétique de l'aimant équivalent est $\pi i k^2$. Soient maintenant deux cercles de rayons très petits k et k_1, situés à une grande distance l'un de l'autre et dans des plans normaux, de façon que le centre O du premier se trouve sur une perpendiculaire élevée au centre O' du second : un même courant d'intensité i traverse ces deux conducteurs. Remplaçons (*fig.* 72) chaque circuit par l'aimant équivalent, ns pour O,

Fig. 72.



$n_1 s_1$ pour O', et supposons mobile l'aimant $n_1 s_1$ ou le circuit O'. Les pôles n, s exerceront respectivement sur les pôles n_1, s_1 des forces qui tendront à faire tourner l'aimant ou le circuit mobile autour de son centre O'. Ces forces produiront un couple dont le moment total sera (Chap. VII, n° 5, 2°)

$$M = \frac{m . m_1}{D^3},$$

m et m_1 désignant les moments magnétiques des deux aimants en présence et D la distance de leurs centres. Dans le cas présent, on a

$$(3) \qquad M = \frac{\pi i k^2 . \pi i k_1^2}{D^3}.$$

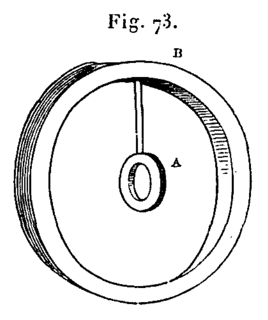
Si l'on fait dans cette formule $M = 1$, $D = 1$, $\varpi k^2 = \varpi k_1^2 = 1$, on obtiendra pour l'unité d'intensité de courant une valeur identique à celle qui a été déduite de l'action réciproque d'un courant et d'un aimant. On peut conclure encore que l'unité d'intensité de courant, enveloppant en cercle l'unité de surface, produit à distance sur un aimant quelconque un couple égal à celui que produirait un petit aimant dont le moment magnétique serait l'unité.

5. Nous avons indiqué plus haut une méthode pour mesurer l'intensité d'un courant en comparant l'intensité du champ magnétique

produit par ce courant avec la composante horizontale H du magnétisme terrestre. On peut encore déterminer ou mesurer l'intensité d'un courant en unités de même espèce, en calculant l'action que les diverses parties du courant exercent l'une sur l'autre, d'après la théorie d'Ampère.

Soit (*fig.* 73) une bobine de petite dimension A, suspendue à l'intérieur d'une bobine plus large B. Au moyen du fil de suspension, on oriente A dans une direction telle, qu'à l'état de repos, c'est-à-dire lorsqu'aucun courant ne passe dans ces bobines, leurs axes soient perpendiculaires l'un à l'autre. Si l'on fait passer le même courant dans les deux bobines à la fois, la petite bobine A dévie et prend une position d'équilibre sous la triple action du couple électrodynamique, de la torsion des fils et du magnétisme terrestre. Mais, si la bobine B est orientée de telle sorte que l'axe de la bobine mobile soit placé dans le plan du méridien magnétique, on élimine à peu près complètement l'action de la Terre, et il ne reste, pour ramener A à sa position primitive, que le seul couple dû à la torsion des fils. Désignons par θ l'angle que font alors les plans des deux bobines; nous avons pour l'intensité i du courant la formule suivante :

Fig. 73.



$$(4) \qquad i = \sqrt{a \frac{\theta}{\cos\theta}},$$

dans laquelle a est une constante, qui varie d'un instrument à l'autre, mais qui, pour un même instrument, peut être trouvée expérimentalement ou déterminée une fois pour toutes par le constructeur.

Cette méthode a été imaginée et employée par Weber; l'instrument est appelé *électrodynamomètre de Weber*.

Démonstration. — Appelons M le couple électrodynamique dû à l'action du courant sur lui-même, et G le couple dû à la torsion du fil de suspension : le premier tend à dévier la bobine A de sa posiion primitive, et le second tend à la ramener à cette position.

Quand la bobine est en équilibre, on a l'égalité

$$G = M.$$

La valeur de G dépend du mode de suspension.

1. Supposons la bobine A suspendue par un fil unique. Le moment du couple de torsion est proportionnel à l'angle de torsion ou de déviation, c'est-à-dire que

$$(5) \qquad G = \gamma\theta;$$

γ est le moment du couple de torsion ou de gyration pour un angle d'écart égal à l'unité; il doit remplacer le produit MH dans la formule générale (Chap. VII, n° 5, 1°); il a donc pour expression

$$(6) \qquad \gamma = \varpi^2 n^2 I = \frac{\varpi^2 I}{t^2} = \frac{\varpi^2 I_1}{t_1^2 - t^2},$$

dans laquelle les mêmes lettres ont la même signification qu'au numéro 8 du même Chapitre; I est le moment d'inertie de la bobine suspendue, et I_1 le moment d'inertie de la masse de forme simple qu'il faut ajouter à cette bobine pour déterminer, comme on sait, par l'expérience la valeur de I. D'autre part, la valeur du couple électrodynamique est donnée par l'équation

$$(7) \qquad M = \beta i^2 \cos\theta,$$

où β est une constante déterminée par la théorie d'Ampère.

En effet, soient k le rayon de la grande bobine B; k_1 celui de la petite bobine A; k_{11} la distance du centre de la bobine A à un point quelconque du contour de la bobine B : cette distance k_{11} devient égale à k lorsque les deux bobines sont concentriques; V le nombre de tours de fil sur la grosse bobine, v le nombre de tours sur la petite. La bobine mobile A peut être remplacée par un aimant équivalent; un seul tour a pour équivalent un aimant dont le moment magnétique est égal à $\pi i k_1^2$; les v tours de fil, parallèles et de même dimension, équivalent à la superposition de v aimants identiques au précédent et, par conséquent, à un aimant résultant dont le moment magnétique sera

$$M_1 = v\pi i k_1^2.$$

Le moment du couple électrodynamique aura donc pour valeur, d'après la formule (1'),

$$M = \frac{iL}{k_{11}^2} \, v\pi i k_1^2.$$

Ici L, qui exprime la longueur totale du fil enroulé sur le cadre B, est égal à $2\varpi V k$ ou $2\varpi \frac{V k^2}{k_{11}}$. On est ainsi conduit à l'expression

$$(8) \qquad M = \frac{2\varpi^2 V v k^2 k_1^2}{k_{11}^3} \, i^2 \cos\theta.$$

Par suite, il vient, pour la condition d'équilibre $G = M$,

$$\beta i^2 \cos\theta = \gamma\theta;$$

d'où

$$i = \sqrt{\frac{\gamma}{\beta} \frac{\theta}{\cos\theta}}.$$

Les valeurs de γ et de β sont évidemment constantes pour un instrument donné, en sorte qu'on peut écrire

$$i = \sqrt{a \frac{\theta}{\cos\theta}}.$$

2. Si la suspension est bifilaire, les équations (5) et (6) doivent être modifiées. Dans ce cas, le moment du couple de torsion est proportionnel à la déviation et l'on a

$$(9) \qquad G = \gamma_1 \sin\theta.$$

γ_1 a pour valeur $p\frac{d^2}{l}$, en appelant p le poids de la bobine, d la demi-distance des fils et l leur longueur commune. Posons, pour abréger, $p\frac{d^2}{l} = mp$; il vient, d'après la formule générale (nº 5),

$$(10) \qquad mp = \frac{\varpi^2 I}{t^2},$$

I étant le moment d'inertie de la bobine et t la durée d'une oscillation simple.

Pour déterminer I, on emploie la méthode déjà indiquée à propos des aimants : on charge la bobine de deux poids égaux, placés symétriquement par rapport à l'axe de rotation et de moment d'inertie connu I_1. Soient p_1 ces poids additionnels et t_1 la nouvelle durée d'une oscillation simple ; on a

$$(11) \qquad m(p + p_1) = \frac{\varpi^2(I + I_1)}{t_1^2}.$$

On déduit de (10) et de (11)

$$m = \frac{\varpi^2 I}{pt^2} = \frac{\varpi^2(I + I_1)}{(p + p_1)t_1^2} = \frac{\varpi^2 I_1}{(p + p_1)t_1^2 - pt^2},$$

et, par suite,

$$(12) \qquad \gamma_1 = mp = \frac{\varpi^2 I_1}{\left(1 + \frac{p_1}{p}\right)t_1^2 - p}.$$

L'équation d'équilibre entre le couple de torsion et le couple électrodynamique est

$$\beta i^2 \cos\theta = \gamma_1 \sin\theta ;$$

d'où

$$i = \sqrt{\frac{\gamma_1}{\beta} \operatorname{tang}\theta}.$$

Si θ est petit, l'intensité du courant sera donnée dans les deux cas par une expression de même forme

$$i = \sqrt{a\theta}.$$

6. Nous ferons encore connaître une autre méthode due à Kohlrausch, pour évaluer les courants en mesure absolue au moyen d'une boussole des tangentes et d'une simple bobine suspendue par deux fils.

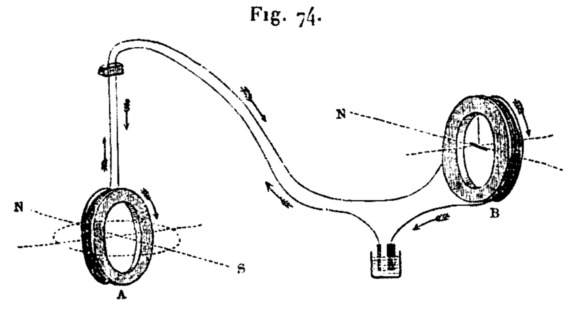
Soit une bobine A (*fig.* 74) de rayon k et de n tours de fil, munie d'une suspension bifilaire et placée dans le plan du méridien magnétique ; soit, d'autre part, une boussole de tangentes à cadre circulaire de rayon k_1. On fait passer un même courant d'intensité i à la fois dans la bobine et dans la boussole, et l'on observe la

déviation θ de la première et la déviation θ_1 de la seconde; on a

$$(13)\qquad i = \sqrt{\frac{k_1^2 \gamma_1 \operatorname{tang}\theta \operatorname{tang}\theta_1}{L n \varpi k^2}}.$$

En effet, la bobine A, traversée par le courant d'intensité i, équivaut à un aimant dont le moment magnétique est $i n \varpi k^2$; elle dévie donc et prend une position d'équilibre sous l'influence du

Fig. 74.



magnétisme terrestre et de la résistance des fils de suspension. Si H est la composante horizontale du magnétisme terrestre, le couple dû à cette composante est $H i n \varpi k^2$ lorsque l'axe de la bobine est normal au plan du méridien magnétique, et $H i n \varpi k^2 \times \cos\theta$ lorsqu'il est dévié de l'angle θ. D'autre part, le couple directeur, qui dans la suspension bifilaire tend à ramener la bobine à sa position primitive, lorsqu'elle dévie d'un angle θ, est égal à $\gamma_1 \sin\theta$, γ_1 se déterminant comme il a été dit plus haut.

On a donc, dans la position d'équilibre, l'équation

$$H i n \varpi k^2 \cos\theta = \gamma_1 \sin\theta;$$

d'où

$$(14)\qquad i = \frac{\gamma_1}{H n \varpi k^2} \operatorname{tang}\theta.$$

Cette seule équation suffirait pour donner i en fonction de H. Mais θ_1 étant la déviation produite par le même courant i lorsqu'il traverse la boussole des tangentes de rayon k_1, on aura d'après l'équation (2), et en appelant L la longueur du fil de cette boussole,

$$i = \frac{H k_1^2}{L} \operatorname{tang}\theta_1.$$

Si l'on élimine H entre cette équation et la précédente en les multipliant membre à membre, on obtient

$$i^2 = \frac{k_1^2 \gamma_1 \operatorname{tang}\theta \operatorname{tang}\theta_1}{L n \pi k^2}.$$

C'est la formule qu'il s'agissait d'établir.

Par l'élimination de i, on pourrait déduire des mêmes équations la composante horizontale H. Il faut remarquer que le produit $n\pi k^2$ représente plus rigoureusement la somme des aires enfermées par les n tours de fil de diamètres différents dont la bobine est composée (*voir* plus loin n° 9).

7. Supposons qu'un même courant traverse successivement deux fils repliés en forme de cercle et suspendus dans des plans parallèles, les centres étant sur une même ligne horizontale et à une distance a l'un de l'autre. Si le courant parcourt ces cercles dans le même sens, il y a attraction mutuelle des fils; s'il les parcourt en sens contraire, il y a répulsion; dans les deux cas, la force a pour expression

$$F = 4\varpi i^2 \frac{k}{a}, \tag{15}$$

k étant le rayon commun des deux circonférences.

Si deux spirales, ainsi suspendues, contiennent chacune n tours de fil, la force d'attraction ou de répulsion mutuelle est

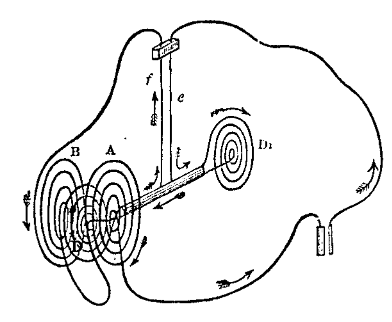
$$F_n = 4\varpi n^2 i^2 \frac{k}{a}. \tag{16}$$

Connaissant l'intensité du courant, on peut ainsi déterminer la force; ou réciproquement, si l'on connaît la force, on peut mesurer l'intensité du courant.

En plaçant dans des plans parallèles et en face l'une de l'autre (*fig.* 75) deux spirales fixes A et B, traversées par un même courant, mais dans des directions contraires, on obtient entre les deux spirales un champ de force magnétique sensiblement uniforme. Si l'on intercale une troisième spirale plate D entre les deux précédentes, elle sera attirée par l'une et repoussée par l'autre : un excellent électrodynamomètre peut être construit sur ce principe. L'intensité du courant correspondant à une valeur donnée du couple

de torsion des fils de suspension e et f est déterminée expérimentalement une fois pour toutes par comparaison avec un instrument servant d'étalon. Une autre spirale plate D_1 doit être ajoutée pour rendre le système indépendant du magnétisme de la Terre ; et, de plus,

Fig. 75.

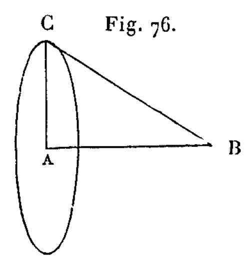


il y a avantage à placer cette spirale D_1 entre deux spirales plates et fixes, enroulées de manière à doubler la valeur du couple qui sollicite les spirales mobiles.

8. 1° Proposons-nous de déterminer l'intensité du champ magnétique produit par un courant circulaire en un point quelconque B d'un axe perpendiculaire au plan du cercle en son centre ([1]).

Soient (*fig.* 76) i l'intensité du courant, k le rayon AC du con-

Fig. 76.



ducteur circulaire, et x la distance AB. Rappelons que la valeur numérique V du potentiel d'un circuit voltaïque en un point donné

([1]) Pour les principes sur lesquels s'appuient ces démonstrations, le lecteur consultera l'Appendice.

est égale au produit de l'intensité i du courant par l'angle solide 2Ω sous-tendu en ce point par le circuit.

On a

$$V = 2\Omega i.$$

L'angle 2Ω est représenté par la portion de la sphère de rayon 1, découpée par le cône d'ouverture 2ω, c'est-à-dire par

$$2\varpi(1 - \cos\omega).$$

D'après la figure, on a

$$\cos\omega = \frac{x}{\sqrt{k^2 + x^2}},$$

et par suite

$$V = 2\varpi i\left(1 - \frac{x}{\sqrt{k^2 + x^2}}\right).$$

Or, l'intensité du champ magnétique en B dirigée suivant l'axe est égale à $-\frac{dV}{dx}$, ou à

$$F = 2\varpi i \frac{k^2}{(k^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}. \tag{17}$$

Au centre A de la bobine, où $x = 0$, l'intensité du champ est maximum et égale à

$$F = \frac{2\varpi i}{k}, \tag{18}$$

résultat déjà connu d'après la formule (1) où l'on introduit les conditions $m = 1$, $L = 2\varpi K$.

Si le fil est enroulé n fois dans le même plan, nous pouvons considérer séparément l'intensité du champ dû à chaque tour et faire la somme des résultats : le potentiel et l'intensité du champ seront l'un et l'autre multipliés par n.

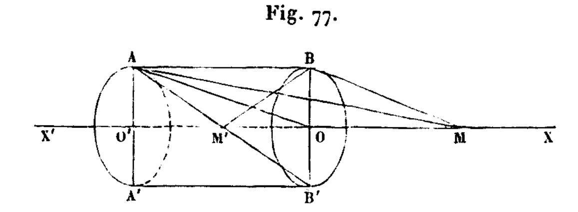
2° Considérons maintenant (*fig.* 77) un fil recouvert de soie enroulé autour d'un cylindre à base circulaire de longueur $2l$, de manière à former une hélice. Nous pouvons substituer à chaque tour de fil un feuillet magnétique équivalent, de même surface et de densité superficielle ρ, telle que l'on ait

$$\rho = n_1 i,$$

n_1 étant le nombre de tours dans l'unité de longueur de l'hélice.

Les surfaces en contact de tous ces feuillets, ayant des charges égales et de signes contraires, s'annulent réciproquement, sauf les

Fig. 77.



deux extrêmes. La distribution résultante, à l'extérieur du système des feuillets, se réduit donc à une couche superficielle de densité $+ n_1 i$ à l'une des extrémités et $- n_1 i$ à l'autre extrémité.

Prenons un point M sur l'axe, à l'extérieur du cylindre, et du côté de la face B que nous supposons *positive,* et appelons 2Ψ et $2\Psi_1$ les angles sous lesquels on voit du point M les deux bases A et B. On sait que l'intensité, parallèle à l'axe du champ magnétique, due à ces distributions est respectivement $2 n_1 i \Psi_1$ et $- 2 n_1 i \Psi$. La force magnétique résultante est donc exprimée par

$$2 n_1 i (\Psi_1 - \Psi);$$

d'où

$$F = 2 \varpi n_1 i (\cos\psi - \cos\psi_1) = \frac{\varpi n i}{l} (\cos\psi - \cos\psi_1),$$

ψ et ψ_1 étant les demi-angles au sommet des deux cônes MO'A et MOB, et n le nombre de tours dans la longueur $2l$. Si l'on pose $MO = a$, on peut encore écrire l'expression de F comme il suit :

$$F = \frac{\varpi . n . i}{l} \left[\frac{a + 2l}{\sqrt{k^2 + (a + 2l)^2}} - \frac{a}{\sqrt{k^2 + a^2}} \right].$$

Supposons le point M à l'intérieur de l'hélice; pour trouver l'intensité du champ, pratiquons une cavité renfermant le point M, en enlevant un des feuillets élémentaires (*fig.* 78).

Soit PQ le feuillet enlevé; la force magnétique en M, due à la

distribution positive $+ n_1 i$ sur P, a pour valeur

$$+ 2\varpi n_1 i.$$

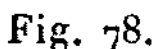
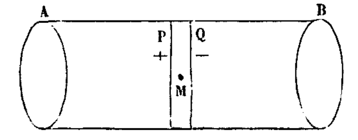


Fig. 78.



Pareillement, la force produite en M par la distribution négative $- n_1 i$ répandue sur Q est

$$- 2\varpi n_1 i.$$

Par suite, la résultante totale, due à ces deux distributions, est égale à

$$4\varpi n_1 i.$$

D'autre part, la force magnétique, exercée en M par les distributions extrêmes A et B, a pour expression, d'après une convention très simple sur les signes,

$$- 2 n_1 i (\Psi + \Psi_1).$$

L'intensité du champ magnétique à l'intérieur de l'hélice est donc

$$2 n_1 i (2\varpi - \Psi - \Psi_1),$$

ou, en remplaçant les angles solides Ψ et Ψ_1 par leurs valeurs $\varpi(1 - \cos\psi)$ et $\pi(1 - \cos\psi_1)$,

$$F = 2\varpi n_1 i (\cos\psi + \cos\psi_1),$$

ou enfin

$$F = \frac{\varpi n i}{l}\left[\frac{a}{\sqrt{k^2 + a^2}} + \frac{2l - a}{\sqrt{k^2 + (2l - a)^2}}\right].$$

L'intensité du champ est maximum au centre de l'hélice; si l'on appelle $2d$ la diagonale de la spirale, cette intensité a pour expression

$$F_m = \frac{2\varpi n i}{d}.$$

Si l'hélice est longue et étroite, les angles solides Ψ et Ψ_1 auront de faibles valeurs par rapport à 2ϖ, et l'intensité du champ dans l'intérieur de l'hélice devient sensiblement constante et égale à $4\varpi n_1 i$: résultat généralement admis dans la pratique. Par exemple, si la longueur de l'hélice est égale à 40 fois le diamètre de sa base, l'intensité du champ magnétique ne varie pas de $\frac{1}{100}$ sur les $\frac{7}{8}$ de la longueur de l'axe.

9. Une longue spirale de fil recouvert d'une enveloppe isolante, dont le diamètre est petit par rapport à la longueur, s'appelle ordinairement un *solénoïde;* toutefois, ce nom ne s'applique rigoureusement qu'à un système d'anneaux égaux et parallèles dont les centres équidistants se trouveraient sur un axe commun et qui seraient traversés par le même courant. La représentation matérielle du solénoïde ne diffère que très peu, au point de vue expérimental, du type hypothétique que l'on vient de définir.

Nous avons déjà énoncé cette conséquence de la théorie d'Ampère, qu'un courant circulaire ou une série de n courants circulaires, parallèles et situés dans le même plan, agissait à distance sur un pôle magnétique ou sur un courant électrique, comme le ferait un petit aimant dont le moment magnétique serait

$$in\varpi k^2,$$

ϖk^2 étant l'aire enfermée dans chacun de ces courants.

Cela posé, considérons (*fig.* 79) un solénoïde commençant en A

Fig. 79.

A B

et prolongé indéfiniment vers B. Chaque courant élémentaire peut être remplacé par un petit aimant, normal au plan du courant, de longueur d et de densité superficielle ρ, telles que l'on ait

$$\rho . d = i,$$

d étant la distance constante de deux courants consécutifs. Les pôles en contact de tous ces petits aimants, ayant des densités magnétiques égales et de signes contraires, s'annulent réciproque-

ment, sauf les deux extrêmes. Dans le cas actuel, le solénoïde indéfini agit donc sur tous les points situés à une distance finie de l'extrémité A, comme s'il y avait en A un pôle magnétique dont l'intensité M serait

$$M = \varpi k^2 \rho = \frac{i}{d} \varpi k^2;$$

$\frac{i}{d}$ désigne l'intensité du courant par unité de longueur de chaque aimant; par suite, s'il y a n courants dans un *centimètre,* on a

$$M = ni\varpi k^2.$$

Un solénoïde ordinaire agit en réalité comme s'il était formé de deux solénoïdes indéfiniment prolongés et superposés l'un à l'autre, parcourus par le même courant mais en sens contraires, l'un ayant son origine en A et l'autre en B. On aurait un pôle nord en A, par exemple, et en B un pôle sud; dans l'intervalle, les deux systèmes de courants détruiraient mutuellement leurs effets. Le moment magnétique du solénoïde ainsi formé est égal à

$$ML = ni\varpi k^2.L,$$

L étant la longueur du solénoïde.

Appelons N le nombre total des courants élémentaires rassemblés sur le même axe entre A et B; on a évidemment

$$n = \frac{N}{L};$$

d'où

$$ML = Ni\varpi.k^2.$$

On conclut de cette formule que le moment magnétique d'un solénoïde est, pour un même nombre de tours de fils ou spires, indépendant de la longueur de l'axe ou de la *directrice*.

Imaginez une montre, placée à l'intérieur du solénoïde, dans une position telle que le courant circule dans le sens de la marche des aiguilles; le pôle sud se trouvera à l'extrémité vers laquelle est tourné le cadran de la montre.

10. Considérons un aimant suspendu, le pôle nord en bas, suivant l'axe d'un solénoïde vertical, et supposons que le courant suive

dans les spires la marche des aiguilles d'une montre, pour un observateur qui regarderait d'en haut la spirale et le cadran de la montre.

Le pôle nord de l'aimant est attiré, tant qu'il se trouve en dehors du solénoïde, comme il le serait par le pôle sud d'un autre aimant ; il est encore attiré et pour ainsi dire *aspiré,* même après qu'il a pénétré dans l'intérieur du solénoïde, mais la force qui l'entraîne ainsi va en diminuant. En même temps le pôle sud de l'aimant est repoussé de bas en haut; mais cette force de répulsion est inférieure à la force d'aspiration qui sollicite le pôle nord. Lorsque le centre de l'aimant est arrivé au centre du solénoïde, l'aimant est en équilibre si l'on n'envisage que les seules forces magnétiques exercées sur lui. Supposons qu'on l'abandonne alors à lui-même; il tend à descendre sous l'action de la pesanteur; mais les forces magnétiques opposent une résistance à cette chute, et, si le courant qui anime le solénoïde est suffisamment énergique, ces forces soutiendront l'aimant dans la spirale et l'empêcheront de tomber.

Feilitsch a fait des expériences pour montrer comment diminue la force d'attraction dont on vient de parler. Il employait d'une part un aimant de $10^{cm},1$ de longueur et de $2^{cm},03$ de diamètre, pesant $23^{gr},698$, et, d'autre part, un solénoïde ayant 126 tours de fil, $29^{cm},5$ de longueur et $12^{cm},9$ de circonférence intérieure. Le tableau ci-dessous indique en milligrammes la force f qui se produit entre l'aimant et le solénoïde quand le centre de l'aimant est éloigné du centre du solénoïde d'une distance a, évaluée en centimètres.

a.	18,7	16,7	14,7	12,7	10,7	8,7	6,7	4,7	2,7	0,07	—0,13
f.	190	382	493	474	313	115	32	16	11	2	—1

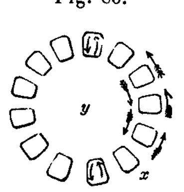
Les pôles d'un aimant, ainsi maintenu en équilibre à l'intérieur du solénoïde, sont disposés par rapport aux deux bouts de l'hélice comme ceux d'un morceau de fer doux, de même longueur, aimanté par l'action du solénoïde. Il en résulte qu'un morceau de fer doux est entraîné dans le solénoïde à l'instar d'un aimant permanent : le pôle nord du fer doux correspond au pôle nord du solénoïde.

11. Un aimant creux ne ressemble pas à cet égard à un solénoïde. Supposons que le pôle nord d'un aimant A soit introduit dans

l'intérieur d'un aimant creux B par le pôle sud de ce dernier; le pôle A est repoussé de l'extrémité B, dès qu'il a pénétré dans l'aimant à une profondeur même très faible. Lorsqu'une tige de fer doux est placée à l'intérieur d'un aimant creux en acier, le pôle nord de l'aimant détermine par induction un pôle sud sur l'extrémité du fer doux qui l'avoisine.

Cette expérience prouve d'une manière concluante qu'il est impossible de regarder un aimant comme étant simplement produit par une série de courants circulant sur sa surface extérieure; mais elle s'accorde avec l'hypothèse qu'un aimant n'est qu'un nombre immense de petits solénoïdes, disposés l'un à côté de l'autre. Concevons, en effet, un groupe de solénoïdes de ce genre, dont la *fig.* 80 montre les bases; chacun de ces solénoïdes est traversé par un courant dans la direction des flèches. Les parties de chaque courant élémentaire, situées à l'intérieur de l'anneau, se meuvent dans le sens des aiguilles d'une montre; les parties extérieures se meuvent en sens contraire. Sur un point intérieur y, l'action des parties intérieures est prépondérante; sur un point extérieur x, c'est l'action des éléments extérieurs qui l'emporte. Enfin les éléments de courant, dirigés suivant les rayons de l'anneau, se détruisent deux à deux; car il y en a autant dans un sens que dans l'autre, c'est-à-dire du centre à la périphérie et de la périphérie au centre.

Fig. 80.



12. En général et pour les recherches ordinaires, on peut considérer le solénoïde comme étant l'équivalent d'un aimant, du moins au point de vue de l'action exercée aux différents points de l'espace extérieurs au cylindre. L'introduction d'un morceau de fer doux dans l'intérieur de ce cylindre a pour effet d'accroître l'intensité du champ de force extérieur. On peut ainsi rendre ce champ 32,8 fois plus énergique qu'il ne l'était auparavant. La direction des lignes de force est très peu modifiée. La *fig.* 81 donne une idée du champ de force créé par le solénoïde seul, et la *fig.* 82 représente ce même champ après l'introduction d'un morceau de fer doux. Le fer doux concentre les lignes de force dans le voisinage des pôles et fournit

ainsi au courant qui traverse le solénoïde le moyen de produire sur un espace très restreint des effets très puissants; son action présente à cet égard quelque analogie avec celle de la lentille dont on se sert

Fig. 81.

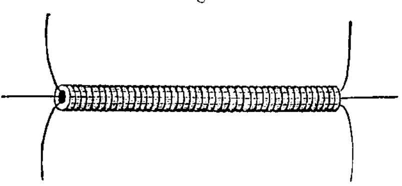
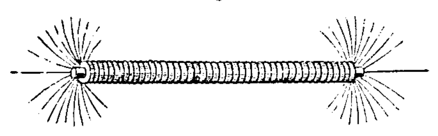


Fig. 82.



pour concentrer une grande quantité de lumière sur un point qu'on veut éclairer fortement.

CHAPITRE IX.

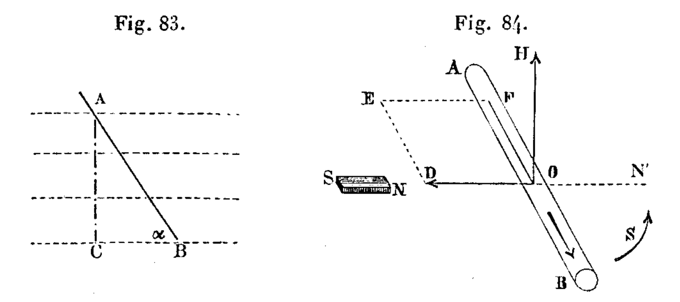
MESURES DE L'INDUCTION ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE.

1. Les principaux phénomènes d'induction magnétique ont été décrits précédemment; il nous faut maintenant étudier comment se mesurent *numériquement* les effets produits dans les diverses circonstances.

Force électromagnétique. — Lorsqu'on a déterminé l'intensité du champ magnétique produit par un aimant ou par un système de courants électriques, on peut aisément connaître l'intensité du courant induit dans un conducteur qui se déplace à travers ce champ. Chaque élément du conducteur, mobile dans le champ et parcouru par un courant induit ou non, est sollicité par une force perpendiculaire au plan passant par cet élément et par les lignes de force du champ. Cette force est égale au produit de l'intensité du courant, exprimée en unités électromagnétiques, par la longueur de l'élément, l'intensité du champ magnétique et le sinus de l'angle que forme la direction de l'élément avec celle des lignes de force. Désignons par AB un élément du conducteur (*fig.* 83), et supposons que les lignes de force soient représentées dans le plan du papier par les lignes ponctuées; la force exercée par le champ magnétique sur le courant est perpendiculaire au plan du papier. Soient H l'intensité du champ magnétique, i l'intensité du courant AB, et α l'angle ABC; la force f a pour expression

$$f = H.i.AB.\sin\alpha. \qquad (1)$$

Cette force est exactement la même que si le conducteur, au lieu d'être représenté en grandeur et en direction par la ligne AB, avait réellement la longueur et la direction de la ligne AC. Supposons (*fig.* 84) que le courant soit dirigé de A vers B et les lignes de force de D vers O, en sorte qu'un aimant, tel que NS, abandonné



à l'action du champ, prendrait de lui-même la position indiquée par la *fig.* 84. La force f qui agit sur le conducteur, tend à le soulever perpendiculairement au plan AOD. Représentons par FO l'intensité du courant et par DO l'intensité du champ magnétique; la force électromagnétique exercée sur l'unité de longueur sera

$$H.i.\sin\alpha.$$

Or $i.\sin\alpha$ est la distance des deux parallèles EF et OD, c'est-à-dire la hauteur du parallélogramme EFOD ; par suite, l'aire de ce parallélogramme est la mesure de la force électromagnétique rapportée à l'unité de longueur.

Un courant dirigé de l'Ouest à l'Est est soulevé de bas en haut par l'action magnétique de la Terre. Voici une règle mnémonique pour reconnaître dans quel sens la force magnétique d'un champ tend à déplacer un courant. Posez un tire-bouchon perpendiculairement au plan EFOD et tournez-le dans le sens indiqué par la flèche, c'est-à-dire de la ligne OB qui marque la direction du courant vers la ligne ON' qui représente la direction nord de l'aiguille aimantée ; l'axe du tire-bouchon se déplace dans le sens de la force f.

2. *Force électromotrice.* — Si le conducteur AB se déplace dans le plan OFED, les forces qui le sollicitent sont perpendiculaires à

la direction du déplacement : aucun travail n'est effectué par le conducteur ni dépensé sur lui. Dans ce cas, aucun courant induit ne peut se manifester dans AB, en produisant une augmentation ou une diminution dans l'intensité du courant préexistant; car l'intensité d'un courant ne peut s'accroître que par un gain d'énergie, et diminuer que par une dépense ou une perte d'énergie.

Si le conducteur se déplace dans la direction OH (*fig.* 84), c'est-à-dire perpendiculairement aux lignes de force et au plan du papier, le déplacement a lieu dans le sens même de l'action de la force ou en sens contraire. Pour déplacer le conducteur à l'encontre de la force électromagnétique, il faut dépenser un travail, qui a pour mesure le produit de cette force par le déplacement. Si le conducteur se meut dans une direction oblique aux lignes de force, le travail dépensé est égal au produit de la résistance électromagnétique par la composante du déplacement normale aux lignes de force.

L'observation apprend que le travail dépensé sur le conducteur est représenté par un accroissement ou une diminution d'intensité du courant qui circule dans ce conducteur; or le travail accompli par un courant (Chap. V, n° 10) est égal à EQ ou Eit, E étant la force électromotrice développée entre les extrémités du conducteur.

Si l'unité de longueur de ce conducteur est transportée sur une distance L, normalement aux lignes de force, dans un champ d'intensité H, le travail dépensé sera $fL = iLH$; et comme le travail effectué par le courant doit être égal au travail dépensé sur le conducteur en mouvement, on a

$$Eit = iLH;$$

d'où

$$E = \frac{HL}{t}. \tag{2}$$

Le rapport $\frac{L}{t}$ est la vitesse de déplacement du conducteur; ainsi la force électromotrice d'induction, qui correspond à l'unité de longueur, est égale au produit de l'intensité du champ magnétique par la vitesse du déplacement.

Cette loi est encore vraie quand le déplacement a lieu dans une

direction oblique aux lignes de force; il suffit de remplacer L par la composante du déplacement normale à ces lignes. Si le conducteur AB était lui-même incliné sur la direction des lignes de force, l'unité de longueur devrait être comptée sur une perpendiculaire à cette direction. Soient OO_1 (*fig.* 85) la direction des lignes de force dans un champ magnétique; *ab* la perpendiculaire à OO_1 dans le plan AOO_1; A*a* et B*b* les perpendiculaires abaissées de A et B sur la ligne *ab*; soit enfin A'B' la nouvelle position du conducteur, en sorte que PO_1, perpendiculaire au plan AOO_1, représente le déplacement normal du conducteur AB à travers les lignes de force. La force électromotrice produite par ce mouvement sera

$$\frac{H.ab.PO_1}{t}.$$

On voit que *l'unité de force électromotrice est celle qui se développe dans une barre métallique de longueur égale à l'unité, placée perpendiculairement aux lignes de force, quand cette barre se meut avec l'unité de vitesse dans un champ magnétique ayant l'unité d'intensité, normalement aux lignes de force et à sa propre direction.*

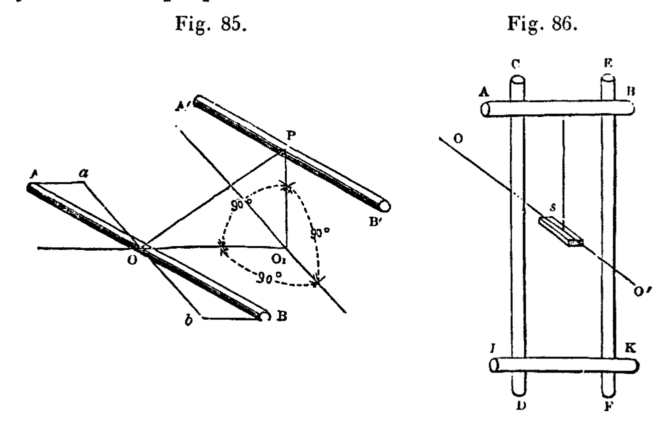


Fig. 85. Fig. 86.

3. Soient (*fig.* 86) CD et EF deux règles fixes, perpendiculaires aux lignes de force magnétique OO'; AB et IK figurent deux autres règles, qui s'appuyent sur les deux premières et sont aussi perpendiculaires aux lignes de force. Ces quatre règles forment un circuit

complet ABIK dans lequel un courant peut circuler. Si AB descend avec une vitesse V, la force électromotrice développée par induction est H.AB.V; mais ce produit est précisément égal au nombre de lignes de force coupées dans l'unité de temps par le conducteur AB, et soustraites de l'aire du circuit fermé ABIK, ou comprises dans le rectangle ABV. En effet, nous avons vu que l'intensité magnétique aux divers points de l'une quelconque des lignes de force est représentée par le nombre de celles qui traversent l'unité de surface, située normalement à leur direction. Si donc N désigne le nombre de lignes de force coupées par AB dans le temps t, on a évidemment pour la force électromotrice

$$E = \frac{N}{t}.$$

Le courant produit par cette force électromotrice doit avoir un sens tel, qu'il s'oppose au mouvement de AB; en appliquant la règle du numéro 1, on trouve que ce courant doit être dirigé de B vers A. Si IK se déplace dans le même sens et avec la même vitesse que AB, il se manifestera dans IK une force électromotrice égale à celle développée dans AB, et produisant un courant dirigé de K vers I, de même intensité que celui créé dans AB. Ces deux forces électromotrices se font équilibre et par suite aucun courant ne peut se manifester. Dans ce cas, le mouvement de IK ajoute au faisceau de lignes de force, qui traversent la surface ABIK, un nombre de lignes précisément égal à celui que le mouvement de AB avait retranché de ce faisceau. En définitive, le nombre total de lignes de force ajoutées ou retranchées étant nul, la force électromotrice résultante doit être aussi nulle.

Si IK se déplace plus rapidement que AB, il devient le siège d'une force électromotrice plus grande, et la différence des deux forces électromotrices dans IK et dans AB sera

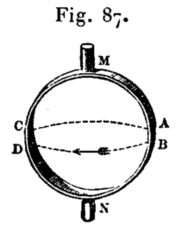
$$\frac{N_1 - N}{t},$$

N_1 et N étant les nombres de lignes de force coupées respectivement par IK et par AB pendant le temps t. Un courant se manifeste alors dans le cadre rectangulaire dans le sens KIAB. Si au contraire

AB se déplaçait d'un mouvement plus rapide que IK, il se développerait une force électromotrice résultante égale à $\frac{N - N_1}{t}$, et engendrant un courant dirigé dans le sens BAIK. Dans ces deux cas, la force électromotrice du courant induit est égale au nombre de lignes de force ajoutées ou enlevées pendant l'unité de temps à la surface ABIK. Des principes développés dans le numéro précédent il suit d'ailleurs que cette règle est vraie non seulement dans le cas simple qu'on vient d'examiner, mais encore dans tous les autres cas. Quelles que soient la forme du circuit et la direction dans laquelle il se meut dans le champ magnétique, la force électromotrice, développée par le mouvement et produisant le courant induit, est égale à $\frac{N}{t}$.

4. Un appareil servant à montrer les phénomènes d'induction au moyen de deux règles fixes et de deux autres règles mobiles serait extrêmement difficile à construire; le mouvement ne pourrait pas se prolonger pendant un temps suffisant, et la résistance du circuit varierait à chaque instant; car la longueur des parties interceptées sur les règles fixes diminuerait ou augmenterait dans le mouvement des règles mobiles. Supposons (*fig.* 87) qu'un circuit fermé tourne dans un champ magnétique; et, pour plus de simplicité, admettons que le circuit est circulaire, le champ uniforme, et l'axe de rotation perpendiculaire à la direction des lignes de force. Supposons en outre que la rotation s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre dont le cadran est tourné vers le haut, et que les lignes de force magnétique soient perpendiculaires au plan du papier et dirigées de telle sorte qu'un pôle nord soit repoussé d'avant en arrière de la feuille. Considérons en particulier les éléments AB et CD, qui sont sensiblement parallèles à l'axe de rotation et perpendiculaires aux lignes de force. Au moment où ces éléments se présentent dans le plan du papier pour le traverser, leur mouvement a lieu suivant la direction même des lignes de force, et un courant circulant dans ces éléments ne serait ni renforcé ni entravé par elles. Mais quand le cercle a effectué un quart de révolution, les éléments AB, CD

Fig. 87.



coupent les lignes de force à angle droit. Si le courant, que nous imaginons dans AB, est dirigé de haut en bas, le mouvement de l'élément AB est entravé par l'action des lignes de force; car un courant descendant repousse de la droite vers la gauche un pôle nord placé en avant du papier, et par suite se trouve lui-même repoussé de la gauche vers la droite. Observons que le pôle nord de l'aimant inducteur doit être en avant du papier pour émettre des lignes de force qui repoussent un pôle nord d'avant en arrière de la feuille, c'est-à-dire qui soient dirigées d'avant en arrière. Il en résulte qu'au moment où AB vient couper à angle droit les lignes de force, il se développe dans cet élément une force électromotrice qui tend à produire un courant descendant; on le reconnaît sans peine en appliquant la règle mnémonique donnée au numéro 1. Il en est de même pour chaque élément du demi-cercle MABN; la force électromotrice développée dans chaque élément diminue proportionnellement au sinus de l'angle que forme l'élément avec la direction des lignes de force. Considérons maintenant l'élément CD; il a coupé, pendant le quart de révolution, les mêmes lignes de force que l'élément AB, mais en sens inverse. En appliquant la règle rappelée précédemment, on trouve que le courant, qui d'après la loi de Lenz doit s'opposer au mouvement de l'élément, est dirigé de bas en haut; par conséquent la force électromotrice d'induction, développée dans le demi-cercle NDCM, agit de N vers M, c'est-à-dire de bas en haut.

Si l'on considère maintenant les deux moitiés du cercle, on voit que la force électromotrice tend à produire un courant qui circule dans le sens MABNDCM.

Cette force électromotrice atteint évidemment sa valeur maximum sur chacun des éléments au moment où le cercle coupe les lignes de force à angle droit, c'est-à-dire a son plan parallèle aux lignes de force. Lorsque le cercle commence son mouvement de rotation et quitte la position représentée dans la figure pour avancer dans le sens indiqué par la flèche, la force électromotrice est très faible; car à cet instant l'angle que fait la direction du mouvement de chaque élément avec la direction des lignes de force est très petit; quand cet angle a atteint son maximum c'est-à-dire 90°, il diminue de nouveau et redevient nul au bout d'une demi-révolution. Pendant la demi-révolution suivante, MABN est derrière le papier, et la force

électromotrice tend à envoyer un courant ascendant c'est-à-dire de A à M à travers BA ; le sens du courant dans l'anneau mobile est donc renversé à chaque demi-révolution, pendant laquelle l'intensité varie de zéro à un maximum déterminé. Le circuit pourrait évidemment être constitué non par un simple cercle, mais par une bobine de fil; la force électromotrice croîtrait avec la longueur du fil enroulé. Toutefois, s'il n'y avait dans le circuit aucune autre résistance que celle de la bobine, l'intensité du courant serait constante quel que fût le nombre des tours de fil ; car la résistance du circuit augmenterait par l'addition de nouveaux tours de fil dans le même rapport que la force électromotrice. Mais si l'on introduit dans le circuit une résistance extérieure, à l'aide de contacts métalliques glissant sur l'axe, le courant induit est d'autant plus intense que le nombre de tours de fil est plus considérable.

Le calcul exact de la force électromotrice, développée dans une bobine de forme quelconque tournant dans un champ magnétique, ne présente aucune difficulté, en dehors de la difficulté, d'ordre mathématique, qu'on peut rencontrer pour faire la somme de toutes les forces électromotrices développées à chaque instant dans les divers éléments de la bobine tournante, ou, ce qui revient au même, la somme N de toutes les lignes de force coupées par le circuit mobile.

On comprend maintenant que la force électromotrice produite par le mouvement d'un circuit fermé dans un champ magnétique d'intensité connue peut être exprimée en fonction seulement de cette intensité et de la vitesse du mouvement ; si l'on choisit les unités convenables, cette expression fournira la valeur de la force électromotrice en mesure électromagnétique absolue. On a vu aussi comment on obtient dans le même système de mesure l'intensité d'un courant quelconque I, et puisque $R = \frac{E}{I}$ dans tous les circuits, la résistance du circuit déplacé dans le champ magnétique peut se déduire des valeurs de E et de I trouvées par l'expérience. Lorsque la résistance d'un circuit simple a été ainsi déterminée, il est possible de construire, par comparaison, une bobine étalon dont la résistance soit égale à un multiple quelconque de l'unité absolue. Cela fait, la résistance de tout autre conducteur s'obtiendra facile-

ment par comparaison avec celle de l'étalon. Nous allons maintenant décrire les expériences qui ont servi à fixer l'étalon de résistance.

5. Considérons une bobine circulaire de rayon K, tournant avec une vitesse angulaire ω dans un champ d'intensité H. Dans la position initiale de la bobine, le nombre N de lignes de force, qui traversent la surface du cadre, est égal à $\varpi K^2 H$, comme on l'a vu plus haut. Après un quart de révolution, le plan du cadre est devenu parallèle aux lignes de force, et par suite N lignes de force ont été soustraites de l'aire du circuit. Après le second quart de révolution, le cadre a repris sa position primitive et par conséquent N lignes de force sont rentrées dans l'intérieur du circuit. Ainsi, pendant chaque demi-révolution, il y a N lignes de force alternativement ajoutées ou retranchées de l'aire du circuit mobile. D'après les développements donnés au numéro 4, on reconnaît que chaque addition ou soustraction de lignes de force tend à produire un courant dans la même direction pour un observateur placé à l'extérieur du cadre. Soit n le nombre de révolutions accomplies par seconde, on a $n = \frac{\omega}{2\varpi}$, et par suite le nombre total de lignes de force, ajoutées et retranchées par seconde, est $4\varpi K^2.H.\frac{\omega}{2\varpi} = 2\omega.K^2.H$. Telle est l'expression de la force électromotrice développée dans le circuit; l'intensité du courant produit sera

$$\frac{2\omega K^2.H}{R},$$

R étant la résistance du circuit. Si le fil enroulé sur le cadre forme m tours, sa longueur totale est $L = 2\varpi K.m$, et l'aire enfermée dans ces m tours est $\varpi K^2.m = \frac{LK}{2}$. On aura, dans ces conditions, pour le nombre de lignes de force ajoutées par seconde

$$\frac{\omega L.K.H}{\varpi},$$

et pour l'intensité du courant

$$\frac{\omega LK.H}{R\varpi}.$$

Cette intensité peut être mesurée en unités absolues au moyen d'un électrodynamomètre ou d'un galvanomètre établi à demeure; cela fait, on déduit de la formule la quantité R qui était à déterminer.

6. La mesure de R, fournie par la méthode précédente, exige à la fois la connaissance de l'intensité H du champ magnétique et la détermination de l'intensité absolue d'un courant.

Ces deux observations peuvent être évitées par l'emploi d'une méthode due à Sir W. Thomson. Elle consiste à faire tourner d'un mouvement rapide autour d'un axe vertical un anneau sur lequel est enroulé un fil conducteur, et à observer la déviation d'un petit aimant mobile au centre de cet anneau. La direction du courant change à chaque demi-révolution dans le fil conducteur; mais, par suite des positions différentes qu'il occupe, il agit toujours dans le même sens sur l'aimant placé au centre. L'aimant prend, sous l'action combinée du magnétisme terrestre et du courant induit qui se développe dans le cadre, une situation d'équilibre et se dévie d'un angle *dans le sens même du mouvement de rotation.* L'équation d'équilibre s'établit comme pour la boussole ordinaire des tangentes. Le couple exercé par la Terre sur l'aiguille, de moment magnétique ml, est

$$Hml.\sin\delta.$$

Le couple électromagnétique, dû au cadre mobile, a pour valeur

$$\frac{L^2\omega.H}{\varpi.K.R}\,ml\cos\delta.$$

On a donc

$$\operatorname{tang}\delta = \frac{\omega.L^2}{\varpi K.R},$$

d'où

$$R = \frac{\omega L^2}{\varpi K.\operatorname{tang}\delta}. \tag{3}$$

Cette formule donne une expression simple de la résistance d'un circuit en mesure absolue et en fonction de grandeurs connues et simples. En réalisant l'expérience qui vient d'être décrite, il y a un certain nombre de corrections à introduire, par exemple, celle relative aux effets d'induction de l'aimant sur la bobine. L'expérience

a été effectuée avec un grand soin par une commission de l'Association Britannique; on a déterminé par ce procédé la résistance absolue d'une bobine étalon, qui sert ensuite à déterminer la résistance absolue de tout autre conducteur.

7. Lorsque l'induction est produite, non plus par le mouvement d'un fil dans un champ magnétique, mais par suite de la création instantanée d'un champ magnétique dû à un courant qui *commence* dans un conducteur voisin, l'effet est exactement le même que si le fil avait été instantanément transporté de l'infini dans la position qu'il occupe actuellement au sein du nouveau champ magnétique. Dans ce cas, la force électromotrice est encore égale à $\frac{N}{t}$, N étant le nombre des lignes de force introduites dans la surface du circuit pendant le temps t. Lorsque l'induction est déterminée par la cessation brusque d'un courant, la force électromotrice développée dans le fil induit est aussi égale à $\frac{N}{t}$, N étant le nombre de lignes de force enlevées de la surface du circuit. Si l'on rend t très petit, la force électromotrice qui tend à produire un courant induit peut augmenter indéfiniment; de même, si un courant qui *commence* atteint dans un temps très court sa valeur normale, il se développe sur un circuit fermé voisin une force électromotrice de beaucoup supérieure à celle qui engendre le courant primitif ou inducteur. On appelle souvent *fil* ou *circuit primaire* le fil traversé par le courant inducteur, et *circuit secondaire* le fil traversé par le courant induit.

8. Pour déterminer la force électromotrice, développée dans un circuit secondaire par un courant qui commence ou finit dans un circuit primaire, il faut calculer le nombre N de lignes de force, subitement engendrées ou détruites, qui traversent la surface embrassée par le circuit secondaire. Il est évident que les lignes de force, qui traversent cette surface dans des directions contraires, doivent être prises avec des signes contraires, les unes positives, les autres négatives; la somme algébrique N de ces lignes, divisée par t, donne la valeur de la force électromotrice. Il est très difficile de connaître t; car un courant ne prend pas naissance instantanément et

la loi suivant laquelle croît son intensité est extrêmement complexe. En employant le courant à induire un ou plusieurs courants dans des conducteurs secondaires, on augmente notablement la valeur de t. L'induction statique, quand elle donne lieu à des effets sensibles, augmente aussi t; et il en est de même de l'aimantation du fer ou de l'acier sous l'influence des courants. Nous ne nous proposons pas ici de déterminer la force électromotrice qui prend naissance dans un circuit secondaire de forme quelconque; mais les notions qui précèdent servent à montrer comment on peut accroître ou diminuer cette force électromotrice dans la construction des appareils d'induction.

9. On vient de voir comment on peut, théoriquement du moins, mesurer la résistance, la force électromotrice et l'intensité d'un courant en unités électromagnétiques absolues. Une quantité d'électricité peut être mesurée en observant l'intensité totale du courant qu'elle fournit à travers un conducteur, et l'on obtient cette intensité par une méthode simple, que nous indiquerons plus loin et qui repose sur l'usage du galvanomètre ; mais on peut aussi mesurer une quantité d'électricité par les effets électrostatiques qu'elle produit; une fois connue en unités électrostatiques, la mesure sera convertie en unités électromagnétiques, en multipliant le résultat par la constante v, c'est-à-dire par 28.225.000.000. La capacité se déduit de la mesure de la charge électrique accumulée sur un conducteur porté à un potentiel E. En nous plaçant au point de vue théorique, nous pouvons dire ainsi que l'étude des lois de l'induction électromagnétique nous a fourni les moyens de mesurer toutes les grandeurs électriques dans le système des unités électromagnétiques. Les méthodes de mesure adoptées dans la pratique seront exposées plus loin.

10. Dans les deux cas simples traités ci-dessus, c'est-à-dire ceux d'un fil rectiligne qui se déplace ou d'un anneau qui tourne dans un champ uniforme, on a présenté des exemples de calcul des courants induits, qui serviront à montrer comment tous les problèmes de ce genre doivent être abordés. La solution rigoureuse de ces problèmes exige en général une analyse mathématique très

élevée; mais on peut se faire aisément une idée assez exacte de la nature des effets qui doivent se produire, à l'aide des principes généraux élémentaires précédemment établis. Par exemple, il est facile de reconnaître si la force électromotrice créée par l'induction agit dans le même sens sur toutes les parties du circuit; dans le cas contraire, on réduira les actions antagonistes en réduisant la vitesse des éléments qui en sont le siège et en reléguant ces parties du circuit dans les plages les moins intenses du champ magnétique.

D'autre part, les autres éléments du circuit dont les actions sont de même sens seront placées dans les parties les plus intenses du champ et recevront aussi le mouvement le plus rapide; on jugera aisément encore de la direction du mouvement qui sera le plus efficace. On pourra enfin prévoir l'effet général qui résulte d'un allongement du fil de la bobine où l'induction a lieu, et reconnaître dans quel cas il est avantageux de former ce conducteur d'un fil peu résistant. En augmentant le diamètre du fil, on n'augmente pas la force électromotrice, mais on diminue la résistance, et un fil gros et court peut fournir un courant très intense si, en dehors de la bobine mobile dans le champ, il n'y a pas une résistance extérieure considérable que le flux électrique doive surmonter. Mais si l'on veut produire un courant énergique ou même seulement d'une intensité appréciable à travers un circuit extérieur de grande longueur, et par conséquent de grande résistance, il est nécessaire de former la bobine d'induction d'un fil très long, pour qu'elle développe une force électromotrice considérable; dans ce cas, la résistance propre de la bobine ne diminuera pas notablement l'intensité du courant, parce qu'elle n'accroîtra pas d'une manière sensible la résistance totale du circuit. Si l'on se propose d'obtenir des courants induits de très courte durée, on imprime à la bobine ou au conducteur rectiligne un mouvement rapide dans un champ magnétique peu étendu, mais très intense; si les courants induits doivent durer plus longtemps, il faut prolonger le mouvement de la bobine ou du conducteur mobile, et par suite disposer d'un champ magnétique de grande étendue.

CHAPITRE X.

UNITÉS ADOPTÉES DANS LA PRATIQUE.

1. Dans le Chapitre précédent, on a exposé de quelle manière l'intensité d'un courant peut être évaluée en mesure électromagnétique. La méthode indiquée, sans présenter des difficultés extrêmes, est cependant trop compliquée pour la pratique, et les intensités des courants ne seront déterminées qu'exceptionnellement par ce moyen, tant que les électriciens n'auront pas à leur disposition des électrodynamomètres construits de telle sorte que la déviation, multipliée par un coefficient constant, donne immédiatement l'intensité du courant.

Les mesures directes de la résistance et de la force électromotrice dans le même système d'unités sont encore plus difficiles; mais il n'est pas indispensable d'effectuer directement, à l'aide de ces méthodes compliquées, la mesure absolue de chaque force électromotrice ou de chaque résistance. Un étalon de résistance électrique, à peu près égal à 1000 millions d'unités absolues de résistance (C.-G.-S.), a été préparé par les soins d'une commission de l'Association Britannique. Cet étalon est représenté matériellement par un fil ayant la résistance qui vient d'être définie. Pour mesurer une résistance quelconque x en unités absolues, il suffit donc de comparer x à l'étalon de résistance ou à une copie de l'étalon; le procédé est identique à celui qu'on emploie pour mesurer en mètres une longueur donnée. Théoriquement, la mesure d'une

longueur x en mètres suggère à l'esprit l'idée d'une comparaison entre cette longueur et l'une des dimensions du globe terrestre; en pratique, elle se réduit à comparer la longueur x avec un étalon fixé par l'État et appelé *mètre*.

2. L'étalon de résistance a reçu le nom de *ohm;* il est maintenant d'un usage universel.

Pour les mêmes raisons, on devrait déterminer les forces électromotrices à l'aide de jauges, qui pourraient être de diverses formes. Ainsi la valeur d'une différence de potentiel serait mesurée, dans une telle jauge, par l'attraction mutuelle de deux plaques opposées parallèles ou, ce qui serait moins précis, par la distance à laquelle des étincelles jaillissent à travers l'air entre deux sphères données. Il n'est pas douteux que dans quelques années des jauges de cette espèce ne soient construites et adoptées par les électriciens avec le même caractère d'autorité qui s'attache à l'ohm. En attendant, on exprime souvent les forces électromotrices ou différences de potentiel en fonction de la force électromotrice produite par le modèle spécial de pile qu'on appelle l'*élément Daniell*. La force électromotrice de cet élément est d'environ 100 000 000 unités absolues (C.-G.-S.); elle est à peu près constante. Un étalon de force électromotrice bien préférable est l'élément que M. Latimer Clarck a fait connaître et décrit de la manière suivante :

« La pile est formée de mercure pur, sur lequel on dépose une pâte obtenue en faisant bouillir du sulfate de mercure dans une solution saturée de sulfate de zinc; c'est le pôle négatif de l'élément. Une plaque de zinc pur qui repose sur cette pâte constitue le pôle positif. Le contact avec le mercure est établi par un fil de platine. Cet élément de pile ne convient pas pour la production de courants; car sa force électromotrice faiblit immédiatement quand elle accomplit un travail continu sur un circuit de faible résistance. Il est destiné à servir d'élément type pour la comparaison des forces électromotrices, à l'aide de l'électromètre ou du condensateur ou par tout autre procédé qui ne nécessite pas le passage d'un courant prolongé à travers l'élément. »

La force électromotrice de cet élément est, en unités électromagnétiques, égale à $1,457 \times 10^8$ (C.-G.-S.) ou $1,457 \times 10^5$ (M.-G.-S.).

Déjà on se sert dans la pratique d'une unité de force électromotrice appelée *volt*. Le volt est la force électromotrice représentée par 10^8 unités absolues (C.-G.-S.); c'est à peu près la force électromotrice de l'élément Daniell; la force électromotrice de l'élément Latimer Clarck est de $1^{\text{volt}},457$.

La capacité d'un conducteur donné peut se déterminer en mesure absolue plus aisément que la résistance ou la force électromotrice; on fait communément usage de condensateurs appelés *microfarads*, dont la capacité est environ $\frac{1}{10\,000\,000\,000\,000}$, ou 10^{-13} unités absolues.

3. Ainsi, dans les mesures électriques ordinaires, et même quand il s'agira de calculer les relations qui existent entre certaines forces, le travail ou la chaleur produite et diverses grandeurs électriques, il nous suffira de comparer ces grandeurs électriques avec des étalons connus, qui ont été préalablement établis dans des rapports définis avec les unités de force et de travail. A l'électricien pratique il importe donc beaucoup plus de savoir comparer avec précision deux résistances, les intensités de deux courants, etc., que de pouvoir déterminer ces résistances ou ces intensités en mesure absolue. En réalité, quand on parle de la mesure d'une intensité de courant ou d'une résistance, on entend toujours la comparaison de cette intensité ou de cette résistance avec une unité reconnue et bien définie. Mais cette unité dans la pratique n'acquiert de l'importance que si elle est généralement adoptée; il faut en outre qu'elle facilite plus ou moins les calculs dans l'application des formules qui fournissent les autres grandeurs électriques. Dans le système le plus généralement adopté en Angleterre, les diverses unités ont reçu des noms distincts; elles sont toutes basées sur le système absolu. Elles représentent des multiples ou des sous-multiples des unités absolues, qui elles-mêmes ont une valeur en chiffres incommode dans les calculs.

4. L'unité de résistance s'appelle *ohm* et vaut 10^9 unités absolues de résistance.

L'unité de force électromotrice s'appelle *volt* et vaut 10^8 unités absolues de force électromotrice.

L'unité de quantité est la quantité d'électricité qui serait contenue dans un farad électrisé au potentiel d'un volt; elle n'a reçu aucun nom particulier et pourrait s'appeler un farad comme l'unité de capacité. Cette unité de quantité vaut $\frac{1}{10}$ d'unité absolue de quantité. Les unités dont il est question ici sont les unités dérivées du système centimètre-gramme-seconde. Il y a un grave inconvénient dans l'emploi du mot *unité absolue,* car il ne désigne pas le système des unités fondamentales d'où procèdent les unités dérivés. Les termes *volt*, *farad* et *ohm* sont exempts de toute ambiguïté.

L'unité pratique d'intensité de courant est un farad par seconde; elle vaut $\frac{1}{10}$ de l'unité absolue d'intensité. Souvent on l'appelle, pour abréger, un *farad*, de même que l'on dit simplement d'une vitesse qu'elle est de 100^{m}, sans ajouter les mots « par seconde », qui restent sous-entendus.

5. Comme l'électricien se trouve en présence de grandeurs qui diffèrent considérablement les unes des autres, il convient d'employer des multiples et des sous-multiples des unités précédentes; chacune de ces nouvelles unités a un nom particulier.

Le *mégavolt* vaut un million de volts;

Le *mégafarad* vaut un million de farads;

Le *mégohm* vaut un million d'ohms;

Et de même le *microvolt* vaut un millionième de volt;

Le *microfarad* vaut un millionième de farad;

Le *microhm* vaut un millionième d'ohm.

Le tableau qui suit donne les valeurs de ces diverses unités dans trois systèmes où l'on prend tour à tour pour base, avec le gramme et la seconde, le mètre, le centimètre et le millimètre; dans un quatrième système on a substitué au gramme le milligramme comme unité fondamentale.

DÉSIGNATION des diverses grandeurs électriques.	NOMS des diverses unités pratiques.		VALEUR DES UNITÉS PRATIQUES EN UNITÉS ABSOLUES.			
			Mètre, gramme, seconde.	Centimètre, gramme, seconde.	Millimètre, gramme, seconde.	Millimètre, milligramme, seconde.
Résistance.	Mégohm........		10^{13}	10^{15}	10^{16}	10^{16}
	Ohm............		10^{7}	10^{9}	10^{10}	10^{10}
	Microhm.......		10	10^{3}	10^{4}	10^{4}
Intensité de courant.	Mégafarad..	Par seconde.	10^{4}	10^{5}	$3{,}162 \times 10^{5}$	10^{7}
	Farad......		$\frac{1}{10^{2}}$	$\frac{1}{10}$	$3{,}162 \times \frac{1}{10}$	10
	Microfarad.		$\frac{1}{10^{8}}$	$\frac{1}{10^{7}}$	$3{,}162 \times \frac{1}{10^{7}}$	$\frac{1}{10^{5}}$
Quantité...	Mégafarad..	Par volt.	10^{4}	10^{5}	$3{,}162 \times 10^{5}$	10^{7}
	Farad.....		$\frac{1}{10^{2}}$	$\frac{1}{10}$	$3{,}162 \times \frac{1}{10}$	10
	Microfarad.		$\frac{1}{10^{8}}$	$\frac{1}{10^{7}}$	$3{,}162 \times \frac{1}{10^{7}}$	$\frac{1}{10^{5}}$
Force électromotrice.	Mégavolt.......		10^{11}	10^{14}	$3{,}162 \times 10^{15}$	10^{17}
	Volt...........		10^{5}	10^{8}	$3{,}162 \times 10^{9}$	10^{11}
	Microvolt.......		$\frac{1}{10}$	10^{2}	$3{,}162 \times 10^{3}$	10^{4}
Capacité...	Farad..........		$\frac{1}{10^{7}}$	$\frac{1}{10^{9}}$	$\frac{1}{10^{10}}$	$\frac{1}{10^{10}}$
	Microfarad		$\frac{1}{10^{13}}$	$\frac{1}{10^{15}}$	$\frac{1}{10^{16}}$	$\frac{1}{10^{16}}$

On peut se faire une idée de la grandeur réelle de chacune de ces unités à l'aide des considérations suivantes :

L'ohm est à peu près équivalent à la résistance d'un fil de cuivre pur de $48^{m},5$ de longueur et de 1^{mm} de diamètre, à la température de 0° C.

Le volt est de 5 à 10 pour 100 moindre que la force électromotrice d'un élément Daniell.

Un élément Daniell enverrait à peu près un farad par seconde dans un circuit dont la résistance totale serait un ohm ; mais les éléments Daniell ordinaires ne peuvent produire un courant de

cette intensité, parce qu'ils ont eux-mêmes une résistance supérieure à un ohm. Un seul élément Daniell enverrait sur le câble atlantique un courant d'environ 125 microfarads.

La capacité de la plupart des câbles sous-marins est à peu près un tiers de microfarad par mille.

Lorsqu'on a besoin de convertir des mesures qui sont exprimées en unités absolues basées sur un certain système d'unités fondamentales en unités absolues basées sur un autre système, il est indispensable, pour déterminer le facteur qui sert à opérer cette conversion, de connaître ce qu'on appelle les *dimensions* des unités. En d'autres termes, il faut savoir à quelle puissance chaque unité fondamentale entre dans l'unité dérivée que l'on considère. Si, par exemple, il s'agit de l'unité de vitesse, qui est peut-être la plus simple des unités dérivées, nous dirons que ses dimensions sont représentées par $\frac{L}{T}$, c'est-à-dire le quotient d'une longueur par un intervalle de temps, parce que la grandeur de l'unité de vitesse est proportionnelle à la grandeur de l'unité adoptée pour mesurer les longueurs, et en raison inverse de l'unité choisie pour mesurer le temps. De même l'unité absolue de force est proportionnelle à l'unité de longueur et à l'unité de masse, et en raison inverse du carré de l'unité de temps employée ; les dimensions de l'unité de force sont donc représentées par $\frac{LM}{T^2}$.

Supposons qu'on ait à convertir une mesure, exprimée en unités absolues L, M, T du système (pied-grain-seconde), en unités absolues l, m, t du système (mètre-gramme-seconde); nous avons besoin de connaître les rapports $\frac{L}{l}$, $\frac{M}{m}$, $\frac{T}{t}$ des grandeurs de chaque couple d'unités fondamentales.

Dans l'exemple que nous avons choisi, ces rapports sont

$$\frac{L}{l} = 0,3048, \quad \frac{M}{m} = 0,0648, \quad \frac{T}{t} = 1.$$

Alors, pour passer de la mesure anglaise à la mesure française, on multipliera le nombre qui exprime la grandeur en unités anglaises par chacun de ces rapports élevé à une puissance marquée par

l'exposant de la lettre correspondante dans la formule qui donne les dimensions de l'unité. Si l'exposant était négatif, on diviserait au lieu de multiplier par le rapport des unités. Ainsi pour convertir une vitesse exprimée en mesure anglaise en une vitesse exprimée en mesure française, on multipliera simplement le nombre qui exprime la mesure anglaise par le facteur 0,3048. Pour convertir une mesure de force (pied, grain, seconde) en mesure française (mètre, gramme, seconde), on multipliera la première mesure par le coefficient

$$0,3048 \times 0,0648 = 0,01975.$$

Le tableau suivant donne les dimensions des diverses grandeurs d'après le rapport de l'Association Britannique sur les mesures électriques (1863).

Unités fondamentales.

Longueur = L, Temps = T, Masse = M.

Unités mécaniques dérivées.

Vitesse $V = \frac{L}{T}$, Force $F = \frac{LM}{T^2}$, Travail $W = \frac{L^2M}{T^2}$,

Unités magnétiques dérivées.

Intensité du pôle d'un aimant........................ $m = \frac{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}}}{T}$

Moment magnétique d'un aimant.................... $ml = \frac{L^{\frac{5}{2}} M^{\frac{1}{2}}}{T}$

Intensité du champ magnétique...................... $H = \frac{M^{\frac{1}{2}}}{L^{\frac{1}{2}} T}$

Système d'unités électromagnétiques.

Quantité d'électricité................................ $Q = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}$

Intensité de courant... .. .. $I = \frac{L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}}{T}$

Force électromotrice................................ $E = \frac{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}}}{T^2}$

Résistance d'un conducteur.......................... $R = \frac{L}{T}$

Système d'unites électrostatiques.

Quantité d'électricité.................................... $q = \dfrac{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}}}{T}$

Intensité de courant électrique.......................... $i = \dfrac{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}}}{T^2}$

Force électromotrice.................................... $e = \dfrac{L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}}{T}$

Résistance d'un conducteur.............................. $r = \dfrac{T}{L}$

TABLE

Pour passer du système de mesure anglais (pied-grain-seconde) au système de mesure métrique (centimètre-gramme-seconde) et inversement.

DÉSIGNATION des diverses grandeurs que les coefficients ci-contre servent à convertir.	NOMBRE D'UNITÉS métriques (c.-g.-s.). contenues dans une unité anglaise	LOGARITHMES	NOMBRE D'UNITÉS anglaises contenues dans une unité métrique (c.-g.-s.).	LOGARITHMES
M...........	0,0647989	$\bar{2}$,8115678	15,43235	1,1884321
L, R, $\frac{1}{r}$, V.v..	30,47945	1,4840071	0,03280899	$\bar{2}$,5159929
F .... Les coefficients précédents permettent par leur multiplication de transformer des grains-pieds en grammes-mètres ou inversement.	1,97504	0,2955749	0,506320	$\bar{1}$,7044250
W...........	60,198	1,7795820	0,01661185	$\bar{2}$,2204179
H et les Équivalents électro-chimiques.....	0,0461085	$\bar{2}$,6637804	21,6880	1,3362196
Q, I.........	1,40536	0,1477874	0,711561	$\bar{1}$,8522125
E.m, q et i.	42,8346	1,6317949	0,0233456	$\bar{2}$,3682051
Unité de chaleur..........	0,0359994	$\bar{2}$,5562953	27,7782	1,4437046

SYSTÈME ANGLAIS.

Relation entre les unités absolues (centimètre-gramme-seconde) et quelques unités anglaises.

Soit v le rapport de l'unité électrostatique à l'unité électromagnétique de quantité, qui est à peu près égal à $28,8 \times 10^9$ centimètres par seconde; on a

$$q = vQ, \quad i = vI, \quad e = \frac{E}{v}, \quad r = \frac{R}{v^2}, \quad c = v^2 C.$$

L'unité absolue de force vaut 0,0310666 grain à Londres.

L'unité absolue de travail vaut 0,0310666 grain-pied à Londres.

A Londres le poids d'un grain représente 32,1889 unités absolues de force, et le grain-pied représente 32,1889 unités absolues de travail.

L'unité absolue de force est partout égale à l'unité de poids divisée par g.

L'unité absolue de travail est partout égale au produit de l'unité de poids et de l'unité de longueur divisé par g.

Dans le système anglais, λ étant la latitude du lieu de l'observation, le nombre $g = 32{,}088\,(1 + 0{,}005\,133 \sin^2\lambda)$.

L'unité de chaleur est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° Fahrenheit la température d'un grain d'eau prise à son maximum de densité.

L'équivalent mécanique absolu de l'unité de chaleur vaut 24 861 unités absolues de travail ou 772 grains-pieds, à Manchester.

L'équivalent calorifique de l'unité absolue de travail est égal à 0,000 040 224.

L'équivalent calorifique du grain-pied à Manchester est 0,001 295 3.

L'équivalent électrochimique de l'eau est à peu près 0,02.

SYSTÈME MÉTRIQUE.

Relation entre les unités absolues (centimètre-gramme-seconde) et quelques unités métriques.

L'unité absolue de force vaut 0,001 019 5 gramme à Paris.

L'unité absolue de travail vaut 0,001 019 5 gramme-centimètre à Paris.

A Paris le poids d'un gramme représente 980,868 unités absolues de force et le gramme-centimètre représente 980,868 unités absolues de travail.

L'unité absolue de force est partout égale à l'unité de poids divisée par g.

L'unité absolue de travail est partout égale au produit de l'unité de poids et de l'unité de longueur divisé par g.

Dans le système métrique, λ étant la latitude du lieu de l'observation, le nombre $g = 978{,}024\,(1 + 0{,}005\,133 \sin^2\lambda)$.

L'unité de chaleur est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° C. la température de 1gr d'eau prise à son maximum de densité.

L'équivalent mécanique absolu de l'unité de chaleur est égal à 41 572 500 unités absolues de travail ou à 42354,2 grammes-centimètres à Manchester.

L'équivalent calorifique de l'unité absolue de travail est égal à 0,000 000 024 054.

L'équivalent calorifique du gramme-centimètre à Manchester est égal à 0,000 023 6154.

L'équivalent électrochimique de l'eau est à peu près 0,00092.

CHAPITRE XI.

THÉORIE CHIMIQUE DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE.

1. On a décrit au Chapitre III (nº 15) le phénomène de l'électrolyse et montré que l'eau est un électrolyte. La décomposition de l'eau est rendue beaucoup plus facile par l'addition d'une petite quantité d'acide, qui a pour effet de diminuer la résistance du liquide; il en résulte que l'intensité du courant engendré par une pile de force électromotrice donnée devient beaucoup plus grande à travers le liquide acide qu'à travers l'eau pure. L'acide n'est pas décomposé, ou, s'il est décomposé, ses éléments se recombinent dans le liquide sans jamais apparaître sur les *électrodes :* c'est ainsi qu'on appelle les conducteurs métalliques plongés dans le liquide. On emploie des électrodes en platine ou en or pour montrer la décomposition de l'eau; avec les autres métaux, l'oxygène transporté sur l'électrode positive ne demeurerait pas en liberté; mais il oxyderait le métal au lieu de remplir le tube de l'appareil (*fig.* 41). En général on prend trois ou quatre éléments de pile pour décomposer l'eau. La force électromotrice d'un seul élément Daniell du modèle ordinaire n'est pas suffisante; il nous sera possible de prouver plus loin cette assertion en nous appuyant sur les valeurs, exprimées en unités absolues, de l'affinité chimique des substances employées dans l'élément et du travail nécessaire pour opérer la décomposition. Lorsque les tubes sont gradués et qu'ainsi les volumes des

gaz recueillis dans ces tubes peuvent être mesurés, l'appareil (*fig.* 41) porte le nom de *voltamètre*. A cause de la dissolution d'une petite quantité de gaz dans l'eau, on n'observe jamais dans les tubes les volumes réels, relatifs ou absolus des gaz fournis par le courant. Sauf de très rares exceptions, l'électrolyse n'a lieu que dans les corps liquides. Les sels liquéfiés par la chaleur sont des électrolytes; il en est probablement de même d'un grand nombre d'oxydes fondus au feu; mais la réoxydation a lieu si rapidement qu'il est difficile de vérifier le fait. Le passage de l'électricité à travers les électrolytes paraît s'effectuer suivant la loi de Ohm; le phénomène n'a pas encore été complètement étudié. Certains électrolytes semblent être traversés par des courants de très faible intensité sans subir aucune décomposition.

2. Les électrolytes ne sont pas toujours résolus en leurs éléments simples. Un grand nombre donnent naissance à deux groupes d'éléments; chaque groupe ou chaque élément séparé s'appelle *ion*, suivant la dénomination proposée par Faraday. Dans un même électrolyte, le même groupe ou ion se porte toujours sur la même électrode, en sorte que les ions peuvent être distingués en ions *électropositifs* et ions *électronégatifs;* l'ion électropositif se porte à l'électrode négative et l'ion électronégatif à l'électrode positive.

Un ion déterminé peut changer d'électrode, lorsqu'on change l'électrolyte; ainsi le soufre, qui est électronégatif par rapport à l'hydrogène, se montre électropositif à l'égard de l'oxygène. Les ions peuvent être rangés en une liste telle que chacun d'eux soit électronégatif par rapport à ceux qui le suivent.

L'hydrogène et les métaux sont électropositifs par rapport aux acides et à l'oxygène; l'oxygène est le plus électronégatif, et le potassium le plus électropositif de tous les corps simples.

3. Les bases des sels peuvent être classées dans la pratique parmi les ions électropositifs : lorsqu'on décompose un sel formé de deux ou trois éléments, on constate que la base se porte à l'électrode négative et l'acide à l'électrode positive. Mais cette classification n'est pas rigoureusement scientifique; car, pour les chimistes, la décomposition du sulfate de potasse, par exemple, ne consiste pas

dans la séparation de la base, la potasse, et de l'acide sulfurique, mais plutôt dans la séparation du métal, le potassium, et des autres éléments du sulfate de potasse. Dès que le potassium apparaît à l'électrode négative, il décompose l'eau et se combine avec l'oxygène pour former de la potasse; tandis qu'à l'autre électrode se portent l'acide sulfurique et l'oxygène de la base. Si la décomposition s'opère avec rapidité, quelques bulles d'oxygène et d'hydrogène apparaissent à chaque électrode; mais, dans les conditions ordinaires, ces deux gaz se recombinent et forment de l'eau. En résumé, on peut dire que la base se comporte comme un ion électropositif et l'acide comme un ion électronégatif.

4. Dans le tableau suivant, on a rangé les corps simples dans un ordre tel que chacun d'eux est électropositif par rapport à celui qui le précède. Ce tableau constitue ce qu'on appelle la série électrochimique.

Oxygène.	Chrome.	Argent.	Manganèse.
Soufre.	Bore.	Cuivre.	Aluminium.
Azote.	Carbone.	Bismuth.	Magnésium.
Fluor.	Antimoine.	Étain.	Calcium.
Chlore.	Silicium.	Plomb.	Baryum.
Brome.	Hydrogène.	Cobalt.	Lithium.
Iode.	Or.	Nickel.	Sodium.
Phosphore.	Platine.	Fer.	Potassium.
Arsenic.	Mercure.	Zinc.	

5. La quantité d'un électrolyte quelconque, décomposée par un courant, est proportionnelle à l'intensité de ce courant et à sa durée, c'est-à-dire proportionnelle à la quantité totale d'électricité qui traverse l'électrolyte pendant la décomposition.

Les poids de différents électrolytes, décomposés par un même courant, sont proportionnels à leurs équivalents chimiques. Une table de ces équivalents se trouve dans tous les traités de Chimie.

Des lois précédentes il résulte que, si l'on connaît le poids d'un électrolyte quelconque, décomposé en un temps donné par un courant d'intensité donnée, on pourra calculer, pour tout autre électrolyte, le poids qui serait décomposé en un temps déterminé par un courant quelconque d'intensité connue. Il ne faut pas en conclure que les poids de deux électrolytes, décomposés tour à tour

dans le même temps par une pile donnée, sont simplement proportionnels à leurs équivalents chimiques; car la résistance peut être si différente d'un électrolyte à l'autre que, pour obtenir un courant de même intensité dans les deux cas, il sera généralement nécessaire de recourir à des piles de forces électromotrices très différentes.

Noms des corps simples.	Poids atomiques.	Electrolytes.	Équivalents électrochimiques.
Aluminium	27,5	Al^2Cl^6	0.00093
Antimoine	122	$SbCl^3$	0.00416
Argent	108	$AgCy$ ou $AgAzO^3$	0.01104
Baryum	137	$BaCl^2$	0.00702
Bismuth	210	$BiCl^3$	0.00717
Brome	80	KBr	0.00818
Calcium	40	$CaCl^2$	0.00204
Chlore	35,5	KCl	0.00363
Chrome	52	$CrCl^6$	0.00177
Cobalt	59	$CoCl^2$	0.00302
Cuivre	63,5	$CuCl^2$	0.00325
		Cu^2Cl^2	0.00649
Etain	118	$SnCl^2$	0.00613
Fer	56	Fe^2Cl^6	0.00191
		$FeCl^2$	0.00286
Fluor	19	KF	0.00194
Hydrogène	1	HCl	0.00010
Iode	127	KI	0.01298
Magnésium	24	$MgCl^2$	0.00123
Manganèse	55	$MnCl^2$	0.00281
Mercure	200	$HgCl^2$	0.01022
		$Hg^2(AzO^3)^2$	0.02044
Nickel	59	$NiCl^2$	0.00302
Or	197	$AuCl^3$ ou $AuCy^3$	0.00672
		$AuCy$	0.02014
Oxygène	16	H^2O	0.00082
Platine	197	$PtCl^4$	0.00503
		$PtCy^2$	0.01007
Plomb	207	$PbCl^2$	0.01058
Potassium	39	KCl	0.00399
Sodium	23	$NaCl$	0.00235
Zinc	65	$ZnCl^2$	0.00332

Nota. — Ce tableau précédent a été calculé pour l'auteur par le professeur Owen-Brown; il diffère notablement du tableau donné dans les éditions précédentes (1).

La quantité de chaque électrolyte, décomposée en une seconde par l'unité d'intensité de courant, est parfaitement définie et cons-

(1) Voir l'*Appendice*.

tante ; nous désignerons cette quantité par la lettre ε et nous l'appellerons l'*équivalent électrochimique* de la substance. Puisque les poids des électrolytes, décomposés par l'unité de courant, sont proportionnels aux équivalents chimiques des électrolytes, les poids des ions, qui se portent à chaque électrode, seront eux-mêmes proportionnels à leurs équivalents chimiques ; et par suite, connaissant le poids d'un ion quelconque transporté à l'une ou à l'autre électrode par l'unité de courant dans un temps donné, on pourra calculer les poids de tous les autres ions ; en d'autres termes, on pourra calculer l'équivalent électrochimique de chaque ion et par suite de tous les corps simples. Le tableau ci-contre contient les équivalents électrochimiques de plusieurs corps simples, exprimés en grammes et calculés d'après celui de l'eau qu'on a trouvé par l'expérience égal à $0^{gr},00092$; c'est-à-dire que ces nombres ont été déterminés en supposant que l'unité électromagnétique absolue d'intensité de courant (C.G.S.) décompose en une seconde $0^{gr},00092$ d'eau.

6. Lorsqu'un courant passe d'une électrode métallique dans un électrolyte et le décompose, l'acte de la décomposition est équivalent à la production d'un travail ou à une dépense d'énergie, et peut s'estimer au moyen des unités employées pour la mesure de l'énergie. Soient E la force électromotrice agissant entre les deux électrodes et Q la quantité d'électricité qui a traversé l'électrolyte ; le travail accompli par l'électricité est, comme on sait, nécessairement égal à EQ, et si ce travail est employé tout entier à décomposer l'électrolyte, le produit EQ mesure l'énergie qui doit être dépensée sur l'électrolyte pour vaincre l'affinité chimique des ions. En dépensant ainsi un travail sur l'électrolyte, on peut dire qu'on augmente l'énergie intrinsèque des ions : après leur décomposition ils possèdent une énergie potentielle en vertu de laquelle ils peuvent se recombiner, et pendant cette recomposition ils doivent restituer sous quelque forme l'énergie qu'ils ont reçue dans l'acte de la décomposition ; par exemple, ils peuvent manifester cette énergie sous forme de chaleur. S'il en est ainsi, la quantité totale de cette chaleur de combinaison devra être équivalente à l'énergie dépensée pour effectuer la séparation. Soient θ la quantité de chaleur produite par la combinaison

de l'unité de poids d'un ion avec le poids correspondant de l'autre et ε l'équivalent électrochimique du premier ion; $\theta\varepsilon$ représentera la somme de chaleur développée par la combinaison d'un équivalent électrochimique de cet ion, c'est-à-dire d'un poids précisément égal à celui qui serait décomposé dans l'électrolyte par l'unité de quantité d'électricité; et par suite, $J\theta\varepsilon$ sera l'équivalent mécanique de cette quantité de chaleur. Ici J est égal à 41572500; c'est le coefficient de Joule, c'est-à-dire le nombre d'unités absolues de travail, équivalent à la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° C. la température de 1^{gr} d'eau. Ainsi l'équation qui exprime l'équivalence entre la chaleur dégagée dans la combinaison de deux ions et le travail dépensé pour leur décomposition sera

$$EQ = JQ\theta\varepsilon \quad \text{ou} \quad E = J\theta\varepsilon.$$

Cette équation donne la valeur de la force électromotrice qui est strictement nécessaire pour effectuer la décomposition. Si l'on a une force électromotrice moindre, EQ ne pourra jamais être égal à $JQ\theta\varepsilon$; en d'autres termes, le travail accompli par le courant, quelle que puisse être la résistance interposée, ne sera jamais suffisant pour séparer de son électrolyte un poids d'ion égal à $Q\varepsilon$. Si une force électromotrice plus grande que $J\theta\varepsilon$ est maintenue entre les électrodes, la décomposition s'opérera très vite; mais comme EQ est alors plus grand que $JQ\theta\varepsilon$, une portion de l'énergie du courant sera dépensée à produire un autre effet que la décomposition de l'électrolyte.

7. Nous pouvons regarder le travail, dépensé dans la séparation de deux ions, comme un produit de deux facteurs, l'un étant le poids M d'un des ions et l'autre l'affinité chimique A rapportée à l'unité de poids; on a

$$M.A = E.Q,$$

d'où

$$A = E\frac{Q}{M};$$

mais le rapport $\frac{M}{Q}$ est le poids d'ion fourni par l'unité de quantité d'électricité, c'est-à-dire ε; $\frac{Q}{M}$ est donc $\frac{1}{\varepsilon}$, et par suite on peut

écrire

$$A = \frac{E}{\varepsilon}.$$

Ainsi l'affinité chimique d'un équivalent électrochimique de chaque ion est égale à la force électromotrice nécessaire pour décomposer l'électrolyte.

8. Les ions qui, par leur combinaison, forment un électrolyte, peuvent engendrer un courant au lieu de produire de la chaleur. Supposons que toute l'énergie due à l'affinité chimique soit employée de cette manière. Comme on vient de le voir, la valeur de cette énergie, pour chaque équivalent électrochimique ε, est égale à $J\theta\varepsilon$. L'équivalent mécanique du courant engendré est représenté par $E_1 Q_1$, E_1 et Q_1 étant la force électromotrice et la quantité d'électricité résultant de la combinaison des ions. On aura donc

$$EQ = E_1 Q_1 = JQ\theta\varepsilon;$$

mais la force électromotrice nécessaire pour séparer les ions fait exactement équilibre à la force électromotrice engendrée par la combinaison de ces ions; en d'autres termes, on a $E = E_1$ et par suite $Q = Q_1$. Ainsi la force électromotrice due à la combinaison d'un couple quelconque d'ions est égale à $J\theta\varepsilon$, c'est-à-dire à l'équivalent mécanique de l'action chimique qui est effectuée dans l'unité de temps par l'unité d'intensité de courant.

On peut prendre pour ε l'équivalent électrochimique de l'un ou de l'autre ion; $\theta\varepsilon$ est constant, quel que soit l'ion choisi.

Il est nécessaire d'avoir une table donnant les valeurs de θ, afin de pouvoir calculer, à l'aide de la table des équivalents électrochimiques, la force électromotrice qui peut être engendrée par une combinaison donnée.

9. Lorsqu'une série d'actions chimiques s'accomplit dans un circuit, les unes peuvent tendre à produire une force électromotrice dirigée dans un sens et les autres une force électromotrice dirigée en sens contraire. On exprime ce fait en disant que les valeurs de E sont positives pour certaines réactions et négatives pour d'autres. La valeur résultante de toutes ces actions, c'est-à-dire la force électromotrice

qui tend à produire un courant ou à surmonter la force électromotrice inverse de décomposition, est la somme algébrique de toutes les valeurs de E. Prenons pour exemple l'élément de pile connu sous le nom d'*élément Daniell;* les électrodes sont en cuivre et en zinc; autour du cuivre se trouve une dissolution saturée de sulfate de cuivre, et autour du zinc une dissolution de sulfate de zinc. Les actions chimiques sont les suivantes :

1° L'électrode zinc se combine avec l'oxygène.

2° L'oxyde ainsi formé se combine avec l'acide sulfurique et forme du sulfate de zinc.

3° L'oxyde de cuivre est séparé du sulfate de cuivre.

4° Le cuivre de cet oxyde est séparé de l'oxygène.

Nous considérerons comme positives les deux premières réactions, qui dégagent de la chaleur, et comme négatives les deux dernières, qui en absorbent.

L'oxygène de l'eau est séparé de l'hydrogène à l'électrode zinc; à l'autre électrode cet hydrogène se recombine avec l'oxygène de l'oxyde de cuivre. Aux deux pôles de la pile, il y a donc alternativement décomposition et recomposition des éléments de l'eau; mais ces deux actions chimiques, étant égales et de signes contraires, ne peuvent ni accroître ni diminuer la force électromotrice de la pile.

1° La chaleur développée dans la combinaison de 1^{gr} de zinc avec l'oxygène est de 1301 unités; il se forme $1^{gr},246$ d'oxyde de zinc.

2° La chaleur développée par la combinaison de $1^{gr},246$ d'oxyde de zinc avec l'acide sulfurique étendu est égale à 369 unités.

3° La chaleur développée dans la combinaison avec l'oxygène de $0^{gr},9727$ de cuivre (poids de cuivre déposé correspondant à 1^{gr} de zinc dissous) est égale à 588,6 unités; il se forme $1^{gr},221$ d'oxyde de cuivre.

4° La chaleur développée dans la combinaison de $1^{gr},221$ d'oxyde de cuivre avec l'acide sulfurique étendu est de 293 unités.

L'équivalent thermique de toutes ces actions chimiques, résultant de la dissolution de 1^{gr} de zinc dans l'élément Daniell, est, par conséquent,

$$1301 + 369 - 588,6 - 293 = 788,4 \text{ unités de chaleur.}$$

Mais il nous faut connaître l'équivalent thermique d'un poids de zinc égal à ε; à cet effet, nous multiplierons la quantité totale de chaleur, correspondant à la dissolution de 1^{gr}, c'est-à-dire 788,4, par l'équivalent électrochimique du zinc, c'est-à-dire 0,00342; nous obtiendrons ainsi, pour la valeur de $\theta\varepsilon$, le nombre 2,696; puis nous déduirons la valeur de E en multipliant ce dernier nombre par le coefficient de Joule, égal à 41572500. On trouve ainsi, pour la force électromotrice de l'élément Daniell, à peu près 112000000 unités, valeur qui s'accorde sensiblement avec le résultat de l'expérience directe.

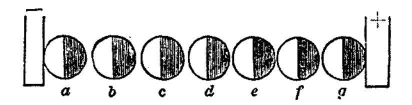
Cette théorie et cet exemple sont tirés d'un mémoire de sir W. Thomson publié en 1851.

10. La décomposition des électrolytes et le transport des ions sur les deux électrodes ont été utilisés de diverses manières. Les éléments ou groupes d'éléments se déposent et s'accumulent sur les électrodes à l'état de pureté parfaite, et par conséquent l'électrolyse offre un moyen d'obtenir des corps chimiquement purs. On peut effectuer des dépôts métalliques sur une électrode d'une forme déterminée dont on veut se procurer la reproduction; la copie ainsi obtenue s'appelle un *cliché*. Souvent aussi, pour orner un objet formé d'un métal commun, on dépose une couche de métal précieux sur cet objet pris comme électrode; c'est l'opération qu'on appelle *argenture* ou *dorure galvanique*. Il n'y a qu'un petit nombre de corps composés susceptibles d'être décomposés par l'électrolyse, et qu'un petit nombre d'ions qui puissent être maintenus en état de séparation pendant le passage du courant.

11. Le passage d'un ion, de l'endroit où l'électrolyse commence jusqu'à l'électrode où il apparaît, semble se produire par une série de combinaisons et de décompositions. Ainsi, quand une molécule d'eau d située à égale distance des électrodes est décomposée, ni son hydrogène ni son oxygène ne traversent le liquide à l'état de gaz libres; mais l'hydrogène de d, indiqué par la partie blanche du cercle figuratif (*fig.* 88), se combine avec l'oxygène de c, indiqué par la partie noire du cercle figuratif c. L'hydrogène de c devient alors libre de se combiner avec l'oxygène de b; enfin l'hydrogène

de *b* se combine avec l'oxygène de *a*, laissant l'hydrogène de *a* en liberté à l'électrode négative. A la suite d'une série de compositions et de décompositions semblables, l'oxygène de la molécule *g* devient libre sur l'électrode positive. Cette explication est d'accord avec

Fig. 88.



l'expérience; car des ions peuvent être transmis à travers certaines substances pour lesquelles ils ont une forte affinité chimique sans les décomposer. Par exemple, on met une dissolution de sulfate de soude dans le vase A (*fig.* 89), une solution de sirop de violette

Fig. 89.

dans le vase B et de l'eau pure dans le vase C; puis on fait passer un courant entre deux électrodes, de C en A. Le sulfate du vase A est décomposé; on trouve de la soude dans A et de l'acide sulfurique dans C. Cet acide ne peut venir que de A, et cependant la couleur de la dissolution de B n'a pas été altérée. On sait que l'addition d'une très petite quantité d'acide sulfurique, versée dans B, rougirait nettement la teinture de violette.

CHAPITRE XII.

THERMO-ÉLECTRICITÉ.

1. Lorsque les soudures d'un circuit formé de deux métaux différents sont portées à des températures différentes, un courant électrique se manifeste en général dans ce circuit. La force électromotrice qui produit ce courant dépend :

1° De la nature des métaux qui forment le circuit;

2° De la différence de température des soudures;

3° De la température moyenne de ces soudures.

Si la température moyenne des soudures est maintenue invariable dans des circuits contenant chacun deux métaux accouplés de diverses manières, et si la différence de température de ces soudures reste faible et constante, la force électromotrice de chaque circuit ne dépend que de la nature des métaux employés. Soit $\varphi(AB)$ le facteur numérique par lequel il faut multiplier la différence de température τ des soudures pour obtenir la force électromotrice d'un circuit composé de deux métaux A et B à la température moyenne t : ce facteur représente ce qu'on appelle le *pouvoir thermo-électrique* du circuit AB à la température t. Soient $\varphi(AC)$ et $\varphi(BC)$ les pouvoirs thermo-électriques du couple [A, C] et du couple [B, C]; on trouve expérimentalement que

$$\varphi(BC) = \varphi(AC) - \varphi(AB).$$

Cette équation exprime ce fait que le pouvoir thermo-électrique de

deux métaux quelconques B et C est égal à la différence de leurs pouvoirs thermo-électriques par rapport à un troisième métal A. Il en résulte que, pour calculer le pouvoir thermo-électrique d'un couple métallique quelconque, il suffit de déterminer successivement par l'expérience les pouvoirs thermo-électriques de tous les métaux par rapport à un même métal choisi pour terme de comparaison; dans ce qui suit, c'est le *plomb* qui nous servira de métal étalon.

2. On dit qu'un métal est positif par rapport à un autre, au point de vue thermo-électrique, lorsque la force électromotrice développée dans un circuit formé de ces deux métaux engendre un courant qui circule du premier au second à travers la soudure chaude, la différence de température τ étant supposée très faible. Il suit du paragraphe précédent que, *pour une température moyenne t des soudures*, les métaux peuvent être rangés en une liste telle que chaque métal soit positif par rapport à ceux qui le suivent, et, de plus, qu'on peut assigner à chaque métal un coefficient proportionnel à son pouvoir thermo-électrique par rapport au plomb : la différence algébrique de ces coefficients pour deux métaux quelconques exprimera, en unités arbitraires, la force électromotrice qui correspond à la température moyenne t des soudures et à une différence très faible et constante de leurs températures, par exemple, l'unité. Dans la plupart des Traités, on trouve des tables qui donnent les valeurs approximatives de ces coefficients thermo-électriques; mais, dans les expériences qui ont servi à les fixer, on a en général négligé la condition que la température moyenne t doit être constante, et même cette température est rarement indiquée. Les séries de coefficients thermo-électriques sont entièrement différentes, aux diverses températures moyennes. Le tableau qui suit est tiré des expériences de Matthiessen et donne approximativement en microvolts le pouvoir thermo-électrique de chaque métal par rapport au plomb et pour une différence de température des soudures égale à 1° C. La température moyenne pour laquelle les nombres de ce tableau sont à peu près exacts est de 19° à 20° C.

Bismuth du commerce en fil	+ 97
Bismuth pur en fil	+ 89
Bismuth cristallisé, parallèle à l'axe	+ 65
Bismuth cristallisé, perpendiculaire à l'axe	+ 45
Cobalt	+ 22
Argent allemand	+ 11,75
Mercure	+ 0,418
Plomb	0
Étain	− 0,1
Cuivre du commerce	− 0,1
Platine	− 0,9
Or	− 1,2
Antimoine pur en fil	− 2,8
Argent pur non recuit	− 3
Zinc pur	− 3,7
Cuivre précipité par galvanoplastie	− 3,8
Antimoine du commerce en fil	− 6
Arsenic	− 13,56
Fil de fer (corde des pianos)	− 17,5
Antimoine cristallisé, parallèle à l'axe	− 22,6
Antimoine cristallisé, perpendiculaire à l'axe	− 26,4
Phosphore rouge	− 29,7
Tellure	− 502
Sélénium	− 807

3. Si deux métaux A et B sont séparés dans un circuit par un ou plusieurs métaux intermédiaires, tous maintenus à une même température t, la force électromotrice est la même que si les deux métaux étaient unis directement et la soudure portée à la même température t. Par exemple, dans la *fig.* 90, les trois circuits ont

Fig. 90.

tous la même force électromotrice, celle qui se produit directement entre le zinc et l'antimoine. Le fil de cuivre peut être remplacé par une chaîne de métaux en nombre quelconque; la force électromotrice du circuit ne sera pas altérée, pourvu que toutes les soudures de la chaîne interposée soient à la même température. Ainsi, la force électromotrice d'un couple, zinc-antimoine par exemple, peut être déterminée en mesurant l'intensité du courant qui traverse un

circuit compliqué, comprenant le fil de cuivre d'un galvanomètre avec ses bornes de laiton, et le fil en argent allemand des bobines de résistance. Toutefois, dans ce cas, il est nécessaire de vérifier l'égalité de température de toutes les soudures dans la chaîne interposée. Pour cela, on observe s'il se produit un courant lorsqu'on retire l'élément thermo-électrique et qu'on relie l'un à l'autre cuivre, laiton, argent allemand, pour former un circuit identique au circuit précédent, d'où l'élément zinc-antimoine ou tout autre couple thermo-électrique serait exclus.

4. Non seulement les pouvoirs thermo-électriques des divers couples changent avec la température moyenne des soudures; mais ils changent dans des proportions très différentes. Ainsi le pouvoir thermo-électrique du couple cuivre-argent conserve à peu près la même valeur aux températures moyennes comprises entre 0° et 100°; mais le pouvoir thermo-électrique du couple fer-cuivre varie rapidement; il tombe à zéro à une température voisine de 284°, pour augmenter ensuite en prenant un signe contraire, en sorte que, par rapport au fer, le cuivre est positif au-dessous de 284° et devient négatif au-dessus de cette température. Si nous voulons avoir une connaissance exacte des pouvoirs thermo-électriques des métaux sur une échelle de température étendue, il nous faut donc des données suffisantes pour construire un diagramme tel que celui de la *fig.* 91, où les ordonnées verticales indiquent les températures en degrés centigrades, et les abscisses indiquent en microvolts les pouvoirs thermo-électriques des métaux par rapport au plomb (¹).

Ce diagramme fournit d'une manière simple les pouvoirs thermo-électriques des différents métaux, l'un par rapport à l'autre, aux diverses températures moyennes. L'échelle horizontale est construite de telle sorte que la distance comprise entre les lignes thermo-électriques de deux métaux quelconques, à une température quelconque, donne précisément les pouvoirs thermo-électriques des deux métaux considérés pour cette température.

(¹) Le premier diagramme de ce genre se trouve dans un Mémoire de W. Thomson sur les propriétés électrodynamiques des métaux (*Phil. Trans.*, 1856).

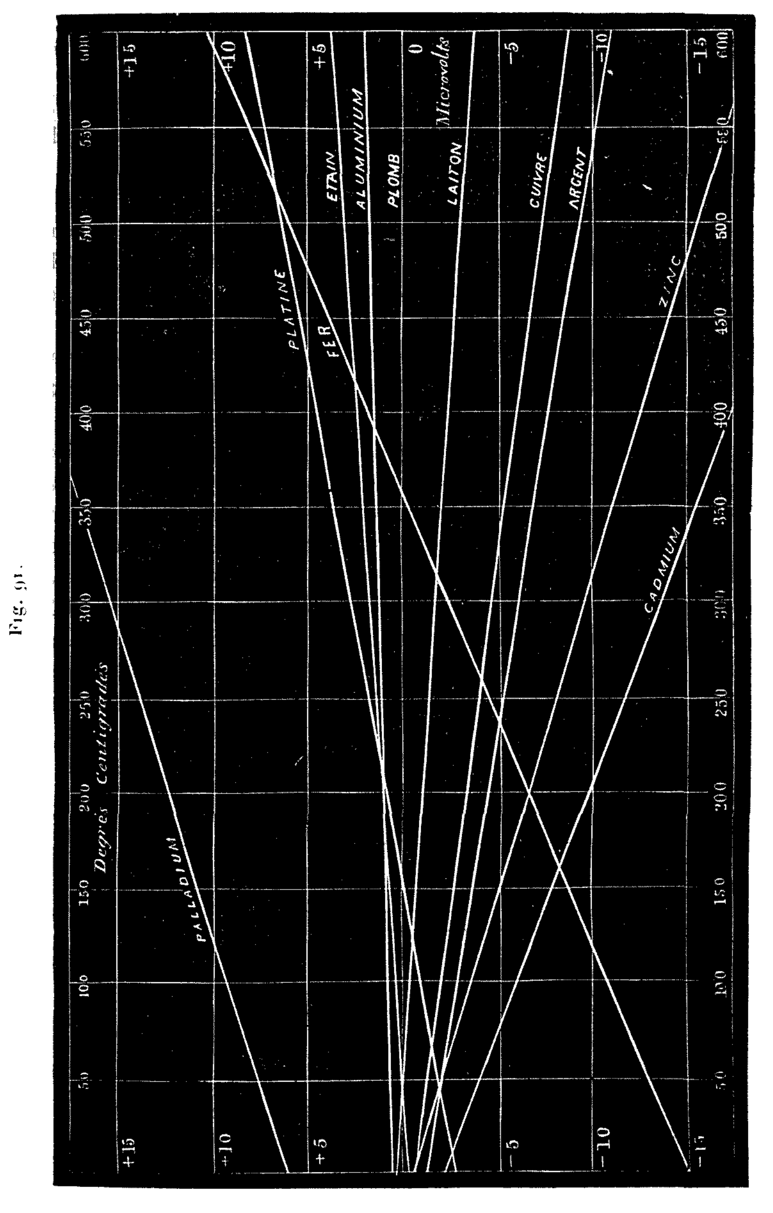

PALLADIUM
PLATINE
FER
ETAIN
ALUMINIUM
PLOMB
LAITON
CUIVRE
ARGENT
ZINC
CADMIUM
Degrés Centigrades
Microvolts
+15
+10
+5
0
−5
−10
−15
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600

Fig. 91.

Ainsi le pouvoir thermo-électrique du couple cuivre-fer à 50° est environ + 11,4; il est nul à 284° et devient — 7,6 à 400°.

Le pouvoir thermo-électrique est affecté du signe + lorsque le courant passe du métal dénommé le premier au second métal du couple, à travers la soudure chaude.

5. Pour de très faibles différences de température entre les soudures, la force électromotrice d'un couple est égale au produit de la différence de température des soudures par le pouvoir thermo-électrique de ce couple.

Sur le diagramme, cette force électromotrice est représentée par l'aire d'un trapèze ou approximativement celle d'un parallélogramme.

Lorsque la hauteur de ce parallélogramme est égale à l'unité, c'est-à-dire lorsque la différence de température entre les deux soudures est égale à 1°, la force électromotrice est simplement représentée par le segment d'abscisse compris entre les lignes thermo-électriques, c'est-à-dire par le pouvoir thermo-électrique du couple.

Quand la différence de température des soudures est considérable, égale à 50° par exemple, la force électromotrice est la même que si l'on avait cinq couples de soudures disposés comme l'indique la *fig.* 92. Supposons que, a et a_1 étant réunis entre eux, on com-

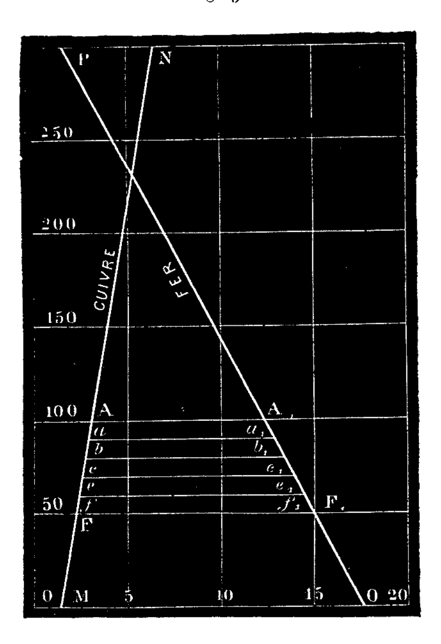
Fig. 92.

50° 60° 60° 70° 70° 80° 80° 90° 90° 100° 100°
f e d c b a
f_1 e_1 d_1 c_1 b_1 a_1
50° 50° 60° 60° 70° 70° 80° 80° 90° 90° 100

plète le circuit en réunissant les soudures b et b_1; on aura dans ce circuit aba_1b_1 une force électromotrice représentée par l'aire du trapèze ou parallélogramme Aa_1 de la *fig.* 93, où MN et OP sont les lignes thermo-électriques du cuivre et du fer. Maintenant rompons le circuit en aa_1 (*fig.* 92) et joignons cc_1; nous aurons un circuit bcb_1c_1, dans lequel la force électromotrice est représentée

par l'aire du parallélogramme ab_1 (*fig.* 93). De même, au circuit cdc_1d_1 de la *fig.* 92 correspond une force électromotrice représentée par l'aire bc_1 de la *fig.* 93, etc.

Fig. 93.



Enfin, si l'on réunit a et a_1 d'une part et f et f_1 d'autre part, toutes les communications intermédiaires étant supprimées, la force électromotrice de la série de couples sera égale à la somme des forces électromotrices des divers circuits élémentaires aba_1b_1, bcb_1c_1, cdc_1d_1, etc., et par suite représentée par l'aire $\mathrm{AFA_1F_1}$ de la *fig.* 93. Ainsi, on peut calculer la force électromotrice d'un couple quelconque dont les soudures sont à des températures quelconques, en calculant l'aire enfermée d'un côté par les lignes thermo-électriques des deux métaux, et de l'autre par les ordonnées correspondant aux deux températures extrêmes.

6. Pour estimer cette aire, il faut remarquer que, si la partie située

au-dessous du point d'intersection des deux lignes thermo-électriques est considérée comme positive, la partie située au-dessus doit être regardée comme négative, parce qu'elle représente une force électromotrice qui tend à envoyer le courant en sens inverse. Si donc les deux soudures sont à des températures telles que ces deux aires partielles soient égales, aucune force électromotrice ne sera produite dans le circuit. Le point d'intersection de deux lignes thermo-électriques se nomme *point neutre;* effectivement, à la température correspondante, les deux métaux du couple ne sont ni positifs ni négatifs l'un par rapport à l'autre : leurs pouvoirs ther moélectriques sont égaux.

Supposons que la soudure froide soit à une température telle, que le triangle ayant pour sommet le point neutre, et pour base l'ordonnée correspondant à cette température, ait une aire plus grande que le triangle de même sommet, limité par l'ordonnée correspondant à la température de la soudure chaude; dans ce cas, le courant passe du métal qui possède, au-dessous du point neutre, le pouvoir thermo-électrique le plus élevé, sur l'autre métal en traversant la soudure chaude. La direction du courant est inverse si l'aire triangulaire située au delà du point neutre est prédominante.

7. Jusqu'à présent nous avons suivi l'exposition de Sir W. Thomson. Guidé par des considérations théoriques, le professeur Tait a prouvé expérimentalement que pour la plupart des métaux les lignes thermo-électriques sont à peu près droites entre 0° et 300° C., et probablement aussi à des températures beaucoup plus élevées. Cette observation facilite notablement le calcul de la force électromotrice, car les aires qu'il s'agit d'estimer sont simplement des triangles ou des trapèzes. Soit m le segment intercepté par les lignes thermo-électriques des deux métaux sur l'abscisse correspondant à la température moyenne des soudures, et soit $t_1 - t_2$ la différence de température des soudures chaude et froide; dans ce cas, la force électromotrice du couple, représentée comme on sait par l'aire d'un trapèze ou d'un triangle, a pour expression le produit $m(t_1 - t_2)$. Il résulte de ce qui précède que si la température moyenne des deux soudures est précisément celle du point neutre, aucun courant ne se manifeste dans le circuit. Cette conséquence

fournit le moyen de déterminer les points neutres des métaux avec une grande exactitude. Le professeur Tait a encore établi ce fait curieux, que la ligne thermo-électrique du fer, pur ou non, devient une ligne sinueuse ou brisée, quand on la prolonge jusqu'à la chaleur rouge, et qu'il peut y avoir ainsi deux ou plusieurs points neutres dans un circuit où l'un des deux métaux est le fer ou l'acier.

La force électromotrice d'un couple quelconque peut être calculée en microvolts à l'aide du diagramme de la *fig.* 91 ; il suffit de mesurer sur l'échelle horizontale la distance des deux lignes thermo-électriques à la température moyenne, et sur l'échelle verticale la différence des températures des soudures en degrés centigrades. Mais il est évidemment plus commode de calculer que de mesurer la longueur de cette distance moyenne; dans ce but, on a construit la table suivante, indiquant les tangentes des angles sous lesquels les lignes thermo-électriques des divers métaux coupent la ligne thermo-électrique du plomb, c'est-à-dire la verticale.

Table thermo-électrique de Tait

(Modifiée pour donner la force électromotrice en microvolts).

MÉTAUX.	TEMPÉRATURE du point neutre avec le plomb, en degrés centigrades, *n*.	TANGENTE de l'angle d'intersection avec la ligne thermo-électrique du plomb, *k*.
Cadmium	— 69	— 0,0364
Zinc	— 32	— 0,0289
Argent	— 115	— 0,0146
Cuivre	— 68	— 0,0124
Laiton	+ 27	— 0,0056
Plomb	//	//
Aluminium	— 113	+ 0,0026
Étain	+ 45	+ 0,0067
Argent allemand	— 314	+ 0,0251
Palladium	— 181	+ 0,0311
Fer	+ 357	+ 0,0420

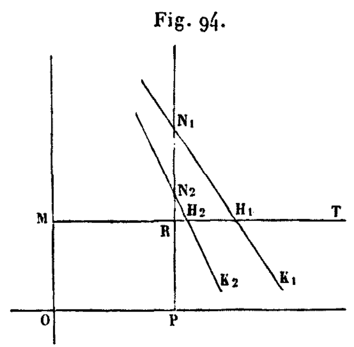
Les valeurs de *k* sont affectées du signe — pour les métaux dont

les lignes thermo-électriques se trouvent à gauche de la ligne du plomb, au-dessous du point neutre (*fig.* 91).

Soient k_1 et k_2 les tangentes de ces angles pour deux métaux donnés; n_1 et n_2 les températures de leurs points neutres sur la ligne du plomb; et t_m la température moyenne de leurs soudures. On a, pour la distance des deux lignes thermo-électriques, à cette température moyenne,

$$m = k_1(n_1 - t_m) - k_2(n_2 - t_m).$$

Fig. 94.



En effet, traçons sur le diagramme ci-contre les deux lignes thermo-électriques K_1N_1 et K_2N_2; elles coupent la ligne du plomb en deux points N_1 et N_2 qui sont les points neutres. Soit OM la température moyenne des soudures; la quantité m est la différence des pouvoirs thermo-électriques des deux métaux par rapport au plomb, à cette température. Le pouvoir thermo-électrique du premier métal et du plomb est

$$RH_1 = RN_1 \operatorname{tang} RN_1H_1 = k_1(n_1 - t_m).$$

Pareillement, le pouvoir thermo-électrique du second métal et du plomb est

$$RH_2 = RN_2 \operatorname{tang} RN_2H_2 = k_2(n_2 - t_m).$$

Il vient pour le pouvoir thermo-électrique des deux métaux

$$H_2H_1 = RH_1 - RH_2,$$

ou

$$m = k_1(n_1 - t_m) - k_2(n_2 - t_m).$$

Cette formule est générale en tenant compte du signe de k.

Considérons, par exemple, le couple cuivre-fer et supposons que la température moyenne soit 50° et la différence des températures 100°; on a pour le fer

$$RH_1 = (357 - 50) \times 0,042 = 12,9$$

et pour le cuivre

$$RH_2 = (50 + 68) \times 0,0124 = 1,46.$$

La valeur de *m* est 11,43; en la multipliant par 100, on obtient 1143 pour la force électromotrice du couple cuivre-fer, exprimée en microvolts.

Quand les lignes thermo-électriques de deux métaux sont à peu près parallèles, la force électromotrice produite par un couple formé de ces métaux est sensiblement proportionnelle à la différence des températures des soudures. Mais s'il s'agit de métaux ou d'alliages dont les lignes thermo-électriques sont inclinées l'une sur l'autre, cette règle n'est plus exacte, et il est nécessaire de connaître, pour déterminer la force électromotrice, non seulement la différence des températures, mais les températures mêmes des soudures.

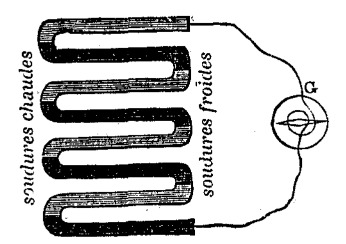
On n'a pas vérifié si les lignes thermo-électriques restaient droites au-dessous de 0°; il ne faut donc utiliser cette table pour calculer la force électromotrice des couples métalliques qu'entre 0° et 400° ou 500° C.

Les métaux employés pour les expériences n'étaient pas chimiquement purs.

8. On peut réunir en série un certain nombre de couples ou éléments thermo-électriques, de manière à obtenir une force électromotrice égale à la somme des forces électromotrices des divers éléments. Pour cela, il suffit de relier les métaux comme le montre la *fig.* 95, et d'échauffer toutes les soudures d'un même côté, tandis qu'on refroidit toutes les soudures de l'autre côté. On construit aisément des piles de cette espèce qui présentent une résistance excessivement faible et sont capables d'engendrer des courants intenses, si la résistance extérieure est faible, plus intenses même que ceux que produirait dans les mêmes circonstances un élément Daniell de dimension moyenne. On peut préparer un couple bismuth-antimoine, ayant une force électromotrice de 100000 microvolts, c'est-

à-dire environ $\frac{1}{10}$ de la force électromotrice de l'élément Daniell; et de plus on peut réduire autant qu'on le veut la résistance de ce couple en augmentant la section de chaque élément. Si chacun des barreaux, bismuth ou antimoine, avait une longueur de $0^{m},02$ et une section de $0^{cq},1$, la résistance intérieure d'un couple serait environ de 3370 microhms; celle de 100 couples pareils serait égale à 337 000 microhms ou à $0^{ohm},337$. Intercalés dans un circuit court et très peu résistant, ces 100 couples produiraient un courant plus intense que celui provenant d'un élément Daniell du modèle ordinaire; en effet, un élément Daniell ordinaire a pour force électromotrice $1^{volt},070$, ou 1 070 000 microvolts, et pour résistance intérieure environ 10 ohms ou 10 000 000 microhms; l'intensité du courant produit par un Daniell dans un circuit extérieur de résis-

Fig. 95.



tance négligeable est donc 0,107 microfarad par seconde. L'intensité du courant produit dans les mêmes conditions par une pile de 100 éléments bismuth-antimoine est

$$\frac{107000 \text{ microvolts}}{337000 \text{ microhms}} = 0,314 \text{ microfarad par seconde.}$$

Il y a des couples thermo-électriques dont la force électromotrice est beaucoup plus grande que celle du couple bismuth-antimoine; mais en général l'accroissement de la force électromotrice est en grande partie compensé par l'accroissement de la résistance intérieure du couple.

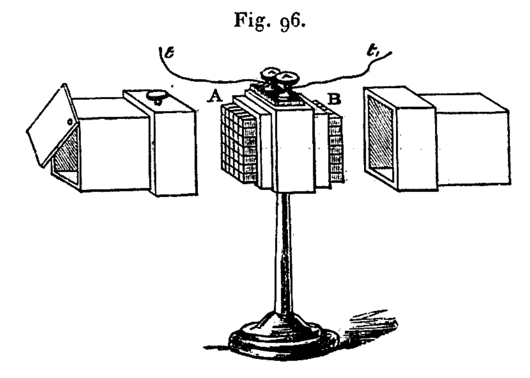
9. Des courants thermo-électriques peuvent être produits par des substances non métalliques. Certains métaux et certains sels

fondus constituent des couples puissants que l'on considère en général comme doués des propriétés thermo-électriques. Becquerel a construit une pile formée d'argent allemand et de sulfure de cuivre artificiel employé sans avoir été préalablement fondu.

Des courants thermo-électriques se manifestent aussi dans des circuits composés de métaux et de liquides et probablement aussi dans des circuits exclusivement formés de liquides.

10. La principale application qu'on ait faite des piles thermo-électriques consiste dans la mesure de faibles différences de température. Cette méthode thermométrique est due à Melloni. Une pile thermo-électrique (*fig.* 96) est reliée par les bornes t, t_1

Fig. 96.



avec un galvanomètre de très faible résistance. Les soudures B sont maintenues à une température aussi uniforme que possible et enfermées à cet effet dans un étui métallique. Les soudures A sont exposées au rayonnement calorifique des sources dont on veut comparer les températures; ces soudures sont aussi protégées par un étui métallique contre les radiations étrangères des objets voisins. Dans la *fig.* 96, on voit ces étuis séparés de la pile.

Quand un corps à température plus élevée que B envoie des radiations sur les soudures A, l'aiguille du galvanomètre est immédiatement déviée dans un sens. Quand les soudures A émettent de la chaleur vers un corps à température moins élevée que B et deviennent elles-mêmes plus froides que B, une déviation de l'aiguille se produit en sens contraire. Pour de petites différences de

température, les intensités des courants sont proportionnelles à ces différences. Cet appareil est tellement sensible qu'il a permis de constater que les radiations des étoiles fixes renferment de la chaleur.

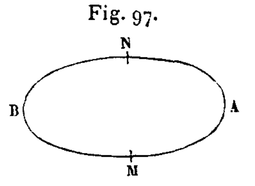
11. Conformément à la doctrine de la conservation de l'énergie, la chaleur se transforme en électricité dans le circuit thermo-électrique, et le travail accompli par le courant est précisément l'équivalent de la chaleur ainsi transformée. Si le travail du courant consiste exclusivement à échauffer les conducteurs, l'effet est simplement un transport de chaleur, au moyen de l'électricité, d'un point à un autre du circuit. Il en résulte que, d'après la loi de dissipation de l'énergie, les diverses parties du circuit sont dans leur ensemble plus rapprochées d'un état de température uniforme que si nul courant n'avait été produit et si la chaleur s'était simplement propagée par conductibilité le long des fils. Lorsque le courant est employé à effectuer un travail mécanique, une quantité équivalente de chaleur disparaît du circuit et se retrouve dans les supports de l'appareil en mouvement et dans les corps sur lesquels il agit. Une portion du travail accompli par le courant peut être encore de nature électrochimique. Sous quelque forme qu'il se présente, le travail accompli dans l'ensemble du circuit a pour valeur totale EQ (Chap. VIII, nº 2).

La chaleur se transforme en électricité à la soudure chaude et aussi dans des parties inégalement échauffées d'un seul métal ou des deux métaux du couple. Peltier a découvert qu'un courant qui traverse un conducteur, formé de deux substances différentes, échauffe une des soudures et refroidit l'autre. En général, la température de la soudure s'abaisse lorsque le courant est dirigé dans le même sens que le courant électrique produit par l'échauffement artificiel de cette soudure; la température de la soudure s'élève lorsque le courant a une direction contraire.

Considérons (*fig.* 97) un circuit bismuth-antimoine BA; si l'on chauffe la soudure N, il se développe un courant allant du bismuth à l'antimoine à travers la soudure chaude; cette soudure tend à se refroidir et absorbe de la chaleur si l'on maintient la température constante, tandis que la soudure M s'échauffe et par suite dégage de la chaleur. D'après cela, on avait admis pendant quelque temps

que la chaleur qui engendre le courant était tout entière absorbée à la soudure chaude, et qu'elle était équivalente à la chaleur développée à la soudure froide, augmentée de la quantité perdue par rayonnement et de celle qui correspond au travail accompli dans le reste du circuit.

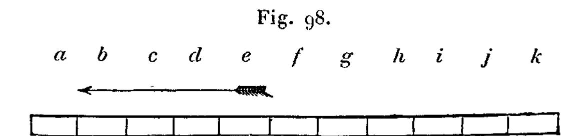
Fig. 97.



Sir William Thomson a montré que cette explication est incomplète, car, lorsque l'une des soudures est à la température du point neutre, l'effet Peltier ne peut se produire; les deux métaux sont alors identiques au point de vue thermo-électrique. Cependant si la soudure chaude est à la température du point neutre et l'autre soudure à une température plus basse, il se manifeste un courant dont l'intensité croît à mesure que diminue la température de la soudure froide, et dont la direction est telle qu'il tend à échauffer cette dernière soudure. Il faut donc qu'il y ait absorption de chaleur en certains points autres que les soudures.

12. On se rendra peut-être mieux compte de la manière dont cette chaleur est absorbée en examinant ce qui se passe quand un courant traverse une chaîne de métaux différents, soudés l'un à l'autre comme le montre la *fig.* 98.

Fig. 98.



Chacun de ces métaux est supposé plus positif que celui qui le précède, le premier métal a de la série étant le moins positif, et le dernier k le plus positif. Quand un courant passe dans le conducteur de a vers k, il est de sens contraire à celui qui traverserait les différentes soudures, si chacune d'elles se trouvait être la soudure chaude d'un circuit formé des deux métaux juxtaposés; par conséquent, toutes les soudures seront échauffées. Si au contraire le courant passe de k vers a, dans le sens indiqué par la flèche, chacune des soudures sera refroidie.

Si l'effet Peltier avait à chaque soudure la même intensité, la barre serait uniformément échauffée ou refroidie dans toute son étendue; mais si l'intensité de l'effet Peltier croît de a vers k, le barreau sera inégalement échauffé ou refroidi par le passage du courant. Dans ce cas, le courant dirigé dans le sens de la flèche produirait un plus fort refroidissement à l'extrémité k, accumulant ainsi en apparence de la chaleur vers l'extrémité a, tandis qu'un courant de sens opposé accumulerait de la chaleur à l'extrémité k; en d'autres termes, dans un barreau de ce genre, on peut dire que le flux d'électricité positive transporte de la chaleur avec lui. Or un conducteur de cuivre, fil ou barre, dont l'extrémité k est plus froide que l'extrémité a, se comporte comme s'il était composé d'un nombre infini de petits éléments semblables à ceux du barreau précédent. Un courant, dirigé de la partie chaude à la partie froide, échauffe la barre de cuivre et transporte de la chaleur avec lui; au contraire, une barre de fer se comporte comme si l'extrémité k était la plus positive quand elle est la plus chaude; de sorte qu'un courant dirigé des points froids aux points chauds échauffe le fer. Le transport électrique de la chaleur dans le fer a lieu dans une direction contraire à celle du courant. On voit qu'un courant dirigé du chaud au froid dans le fer absorbe de la chaleur, de même qu'un courant dirigé du froid au chaud dans le cuivre. Or, lorsqu'un couple est formé de cuivre et de fer avec sa soudure chaude à la température du point neutre, le courant va du froid au chaud dans le cuivre et du chaud au froid dans le fer. Le cuivre et le fer absorbent donc tous deux de la chaleur et les forces électromotrices des deux métaux s'ajoutent. Avec la plupart des couples métalliques, les forces électromotrices des deux métaux inégalement chauffés agissent en sens contraire. Dans ce cas, la force électromotrice la plus grande l'emporte sur la plus faible, et le courant qui se manifeste est dû à la différence des deux forces électromotrices. L'absorption ou le dégagement de chaleur qui résulte de l'inégalité des températures des métaux et le transport électrique de cette chaleur dans le circuit avaient été déduits par Sir W. Thomson de considérations purement théoriques; plus tard il vérifia ses conclusions par l'expérience.

CHAPITRE XIII.

GALVANOMÈTRES.

1. Un galvanomètre est un instrument qui sert à déceler la présence d'un courant et à mesurer son intensité. Il consiste essentiellement en une bobine de fil isolé et en un aimant librement suspendu ou soutenu sur un pivot, et pouvant ainsi dévier lors du passage du courant à travers la bobine. Le fil qui forme la bobine est enroulé de manière que le plan de chaque spire se trouve sensiblement parallèle à l'axe de l'aimant dans sa position naturelle. Le courant, en traversant la bobine de fil isolé, produit un champ magnétique dans la région de l'espace occupée par l'aimant. Le couple qui tend à dévier l'aimant est proportionnel à l'intensité de ce champ et au moment magnétique de l'aiguille (Chap. VII, n° 6). Le couple qui agit en sens contraire et tend à ramener l'aimant vers sa position normale est dû à des forces de diverses natures.

Dans une première classe de galvanomètres, l'aimant est suspendu ou soutenu dans un plan horizontal, et le couple qui tend à le ramener est simplement dû au magnétisme terrestre. En augmentant le moment magnétique de l'aimant suspendu, on n'augmente pas la sensibilité des instruments de cette classe, c'est-à-dire la déviation déterminée par un courant d'intensité donnée; car si le couple qui produit la déviation se trouve ainsi augmenté, le couple qui s'oppose à la déviation est augmenté dans la même proportion. Il est donc de peu d'importance que l'aiguille soit ou non aimantée à saturation : un changement dans le degré d'aimantation de l'aiguille n'altère

pas la sensibilité de l'appareil. Un aimant court et léger se déviera du même angle qu'un aimant long et lourd, et en outre il présentera les avantages suivants :

1° Pour envelopper un aimant de petite dimension, il suffit d'une bobine de petit diamètre, et celle-ci produit pour le même nombre de tours de fil un champ magnétique plus intense qu'une bobine de plus grand diamètre (Chap. VIII, n° 8); elle offre d'ailleurs beaucoup moins de résistance que la bobine de plus grand diamètre faite avec le même nombre de tours du même fil.

2° Le rapport du moment d'inertie au moment magnétique étant moindre pour le petit aimant, celui-ci atteint sa déviation maximum plus vite et revient au repos plus rapidement que l'aimant de grande dimension. Enfin il obéit encore à des courants éphémères qui ne durent pas assez longtemps pour dévier l'aimant de grande dimension.

2. Dans une seconde classe de galvanomètres le couple qui s'oppose à la déviation est dû non plus au magnétisme, mais à la pesanteur. L'aimant se déplace dans un plan vertical, et l'une de ses extrémités porte une légère surcharge, en sorte qu'il se maintient droit dans sa position ordinaire. Un accroissement dans le moment magnétique de l'aimant accroît la sensibilité de ces instruments, en supposant que la surcharge ou le poids directeur reste constant. Il en résulte que, pour obtenir le maximum de sensibilité, les aiguilles doivent être aimantées à saturation; mais en même temps, pour maintenir la sensibilité constante, le magnétisme de l'aiguille doit rester invariable, et ces deux conditions ne peuvent que rarement être réalisées à la fois. La composante verticale du magnétisme terrestre exerce une certaine action directrice sur l'aiguille; mais son effet est d'ordinaire à peu près négligeable par rapport à l'effet de la pesanteur. Ces instruments ne sont pas en général destinés à indiquer des courants de faible intensité, comme ceux qui ont été décrits au numéro 1. Avec de très petits aimants, le moment magnétique est notablement réduit; comme il est difficile de diminuer dans la même proportion la surcharge et le frottement sur les pivots, il y aurait désavantage, dans quelques modèles de ces instruments, à réduire les dimensions de l'aiguille.

3. Lorsqu'on fait choix d'un galvanomètre pour un usage déterminé, il faut d'abord considérer la nature du circuit dans lequel ce galvanomètre doit être placé. L'introduction de la bobine du galvanomètre dans le circuit augmente toujours la résistance de ce circuit et par conséquent diminue l'intensité du courant. Si la résistance de la bobine est faible par rapport à celle des autres parties du circuit, la diminution produite dans l'intensité du courant sera faible aussi et pourra dans certains cas être entièrement négligée. Mais si la résistance du circuit primitif est peu élevée, la simple introduction du galvanomètre, destiné à mesurer ou à indiquer le courant, peut réduire l'intensité au millième ou même à une fraction moindre encore de sa valeur. Il y a toujours avantage à se servir d'un galvanomètre à bobine de médiocre résistance; mais alors pour qu'un courant de faible intensité puisse engendrer un champ magnétique assez énergique, il est indispensable de le faire circuler un grand nombre de fois autour de la bobine, et cette dernière condition est incompatible avec la précédente. On reconnaît aisément que, dans les circuits de faible résistance, le galvanomètre qui donne la plus grande déviation est celui dont la bobine est formée d'un petit nombre de tours de gros fil. Mais dans des circuits de résistance considérable les galvanomètres composés de plusieurs milliers de tours de fil fin sont en définitive les plus avantageux. Dans quelques Traités, ces deux classes d'instruments sont considérées comme s'appropriant à deux sortes de *courants* au lieu de deux espèces distinctes de *circuits* : l'instrument composé d'un grand nombre de tours de fil fin servirait à indiquer des courants d'*intensité* et l'autre à indiquer des courants de *quantité*. Ces deux locutions vicieuses survivent encore, bien que la théorie erronée qui admettait deux sortes de courants soit aujourd'hui réduite à néant : le nom de *galvanomètre d'intensité* s'applique à l'appareil dont la bobine est composée de plusieurs milliers de tours de fil fin, et le nom de *galvanomètre de quantité* à l'appareil formé de quelques tours de gros fil. Nous désignerons ces deux variétés sous les noms de *galvanomètre à long fil* et de *galvanomètre à court fil*.

4. Il est clair que des déviations égales sur le même galvanomètre correspondent toujours à des courants d'égale intensité. Ces courants

peuvent traverser des circuits de nature diverse, et un changement donné dans la composition de chaque circuit modifie en général leur intensité d'une manière très différente; mais, tant que les courants produisent des déviations égales sur le même galvanomètre ou sur des galvanomètres identiques, ils ont même intensité, quelque différents que soient les circuits. Ainsi, quand on emploie un galvanomètre à court fil dont la résistance est de $0^{\text{ohm}},1$ sans introduire dans le circuit aucune autre résistance extérieure à la pile, 1000 éléments montés en série produisent à peu près la même déviation qu'un élément unique de même espèce. Cette pile de 1000 éléments engendre une force électromotrice 1000 fois plus grande que celle due à un seul élément; mais la résistance de chaque élément, que nous pouvons supposer égale à 4 ohms, est beaucoup plus grande que celle du galvanomètre à court fil. Il en résulte que la résistance des 1000 éléments, augmentée de celle du galvanomètre, est à peu près 1000 fois plus grande que la résistance d'un seul élément jointe à celle du galvanomètre : la résistance est, en effet, de $4000^{\text{ohms}},1$ dans le premier cas et $4^{\text{ohms}},1$ dans le second. La résistance varie donc à peu près dans le même rapport que la force électromotrice, et par suite le galvanomètre donne sensiblement la même déviation, indiquant ainsi que le courant a sensiblement même intensité dans les deux cas. En réalité, dans cet exemple, les 1000 éléments doivent donner une déviation supérieure à celle que fournit un seul élément; le rapport des déviations est de 41 à 40 environ. Si l'on emploie un galvanomètre à long fil, ayant par exemple une résistance de 8000 ohms, on obtient des résultats bien différents. Avec un seul élément il arrive qu'aucune déviation ne puisse être observée; mais, avec 1000 éléments, l'aiguille est violemment lancée contre les bornes qui limitent ses mouvements. La cause en est simple. Avec un seul élément, la résistance totale du circuit, qui est de 8004 ohms y compris le fil long et fin du galvanomètre, est trop grande pour que la force électromotrice de cet élément unique engendre un courant capable de dévier l'aiguille; mais, quand on emploie une pile de 1000 éléments, la force électromotrice est devenue 1000 fois plus grande, tandis que la résistance totale du circuit est 8000 + 4000 ou 12000 ohms.

Si l'on admet que la force électromotrice de chaque élément est égale à 1 volt, l'intensité du courant est dans le premier cas $\frac{1}{8004}$ ou $0^{farad},000125$ par seconde; dans le deuxième cas, elle est $\frac{1000}{12000}$ ou $0^{farad},0833$ par seconde, c'est-à-dire environ 666 fois plus grande. Le couple qui dévie l'aiguille du galvanomètre est aussi 666 fois plus grand dans le second cas que dans le premier. On doit remarquer que ni l'un ni l'autre de ces courants n'est aussi intense que le courant observé tout à l'heure avec le galvanomètre à court fil; car, avec ce galvanomètre, un seul élément donne un courant d'une intensité égale à $\frac{1}{4,1}$ ou $0^{farad},244$ par seconde, c'est-à-dire à peu près triple de celle du courant engendré par les 1000 éléments à travers le galvanomètre à long fil. Néanmoins le couple qui sollicite l'aimant du galvanomètre à long fil est beaucoup plus énergique, avec une intensité de courant de $0^{farad},0833$ seulement, que le couple qui sollicite l'aimant du galvanomètre à court fil avec une intensité de $0^{farad},244$; car, pour produire dans les deux instruments un couple de même moment, il suffirait d'enrouler sur le premier trois fois autant de tours de fil que sur le second; or, dans la pratique, le galvanomètre à long fil porte en réalité 400 ou 500 fois plus de tours que l'autre. On obtient le maximum de déviation pour un circuit donné en employant un galvanomètre dont la résistance propre est égale à celle des autres parties du circuit.

5. Lorsque l'aiguille d'un galvanomètre est soumise à l'action directrice d'un champ magnétique, on peut augmenter la sensibilité de l'appareil en diminuant l'intensité de ce champ. Le couple qui s'oppose à la déviation de l'aiguille est proportionnel à l'intensité du champ, et, par suite, en diminuant cette intensité, la déviation produite par un faible courant peut être augmentée pour ainsi dire indéfiniment. Cette diminution dans l'intensité du champ magnétique primitivement établi est obtenue très aisément; il suffit d'installer près du galvanomètre un aimant énergique, en l'orientant de telle sorte qu'il agisse en sens contraire de la Terre, c'est-à-dire dans la direction du méridien magnétique, le pôle nord tourné vers

le Nord, et mieux encore en le plaçant dans le même méridien que l'aimant suspendu; c'est la position la plus favorable pour cet aimant, qu'on appelle souvent *aimant compensateur*. Comme l'intensité du champ diminue sous l'influence de cet aimant, la vitesse des oscillations de l'aiguille du galvanomètre diminue, et, en observant les variations de cette vitesse, on peut mesurer l'accroissement de la sensibilité. En effet, la durée de l'oscillation est inversement proportionnelle à la racine carrée de l'intensité du champ; d'autre part, le moment du couple directeur est proportionnel à cette intensité; on voit donc que la sensibilité, qui est en raison inverse du moment de ce couple, doit varier proportionnellement au carré de la durée de l'oscillation. Tant que l'aiguille d'un galvanomètre conserve un magnétisme invariable, les valeurs relatives de la sensibilité, pour des distances différentes de l'aimant compensateur, peuvent s'apprécier approximativement de cette manière; je dis approximativement, car le nombre d'oscillations qui peuvent être comptées est très petit lorsque la sensibilité est très grande, à cause de la résistance que l'air oppose au mouvement de l'aiguille; et cette résistance exigerait aussi une correction dans la suite des relations énoncées plus haut entre la durée de la période, l'intensité du champ et la sensibilité de l'appareil. La disposition qu'on vient d'indiquer pour obtenir un galvanomètre sensible présente l'inconvénient suivant : comme le champ qui dirige l'aiguille est la différence de deux champs magnétiques à peu près égaux, le plus petit changement dans la direction ou l'intensité de l'un d'eux amène un changement relativement considérable dans leur différence. Or la direction et l'intensité du champ magnétique terrestre varient sans cesse; il est donc presque impossible d'arrêter l'aiguille sur un repère fixe ou sur le zéro, c'est-à-dire d'obtenir une sensibilité constante.

On amène l'aiguille au zéro à l'aide d'un aimant beaucoup plus petit, appelé *aimant de réglage,* que l'on dispose perpendiculairement aux lignes de force du champ magnétique, c'est-à-dire dans la direction est-ouest. Cet aimant peut se mouvoir dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique autour de son centre situé dans le méridien de l'aiguille. L'aimant de réglage, dans sa rotation, ne modifie pas l'intensité du champ dans le voisinage de l'aiguille; il ne fait que modifier la direction des lignes de force.

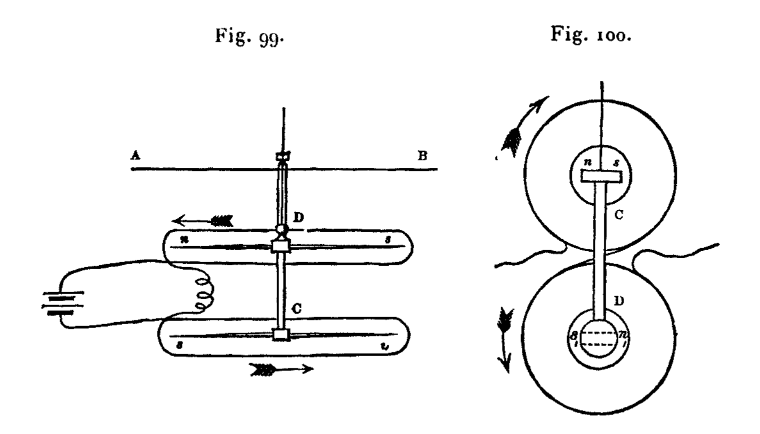
Dans les galvanomètres d'une grande sensibilité, l'aiguille doit être suspendue par un simple brin de soie, tel qu'on l'extrait d'un ruban de soie ordinaire. La viscosité de l'air et la réaction élastique du fil tordu limitent nécessairement la diminution qu'il est possible d'assigner à la force directrice d'après le procédé précédemment décrit.

6. Les instruments les plus sensibles sont connus sous le nom de *galvanomètres astatiques*. Dans ces appareils (*fig.* 99), deux aimants sont réunis par une tige fixe, leurs pôles similaires étant placés dans des directions opposées, et forment ainsi un système unique mobile autour d'un axe. Si les deux aimants avaient leurs moments magnétiques exactement égaux et leurs axes rigoureusement parallèles, ils se tiendraient en équilibre dans toutes les directions, au sein d'un champ magnétique uniforme. Mais le moment magnétique de l'un des aimants excède toujours un peu celui de l'autre, et cette différence suffit pour diriger le système des deux aiguilles. On pourrait former le galvanomètre avec une seule bobine entourant l'une des aiguilles; mais il est évidemment préférable d'envelopper chaque aiguille d'une bobine particulière, en ayant soin de réunir les extrémités des deux bobines de manière que le courant circule dans leur intérieur en sens contraire et fasse dévier du même côté le système des deux aimants. Dans un modèle très répandu de galvanomètre astatique, on emploie des aiguilles longues d'environ $0^{m},05$, et on observe leur déviation au moyen d'un indicateur ou aiguille de verre AB (*fig.* 99), liée rigidement au système astatique par un prolongement de la tige en laiton CD. Cette aiguille oscille au-dessus d'un limbe gradué, et sa position est reconnue à l'aide d'un microscope ou d'une simple loupe. Les bobines sont aplaties et de la forme indiquée dans la *fig.* 99. Afin qu'on puisse introduire commodément l'aiguille aimantée, chacune des bobines est formée de deux moitiés qu'on applique l'une contre l'autre en ménageant entre elles l'espace strictement nécessaire pour permettre à la tige CD de tourner librement sur elle-même.

Dans le galvanomètre astatique à miroir de Thomson (*fig.* 100), les aimants ont des dimensions beaucoup moindres; leur longueur est seulement de $0^{m},006$ environ. Ils sont réunis par une bande d'alu-

minium CD, et sont formés le plus souvent d'un assemblage d'aimants; ainsi l'aimant supérieur est remplacé par quatre petites aiguilles,

Fig. 99. Fig. 100.



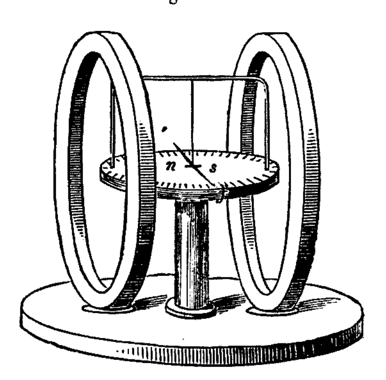
toutes aimantées à saturation et disposées parallèlement avec leurs pôles tournés du même côté. L'aimant inférieur est également remplacé par quatre petites aiguilles semblables, parallèles aux premières, et ayant aussi leurs pôles tournés du même côté, mais en sens contraire des pôles supérieurs de même nom. Les bobines sont circulaires; chacune d'elles est formée de deux moitiés appliquées l'une contre l'autre. Cette disposition constitue le galvanomètre le plus sensible qu'on ait construit jusqu'à présent.

7. La *boussole des tangentes* se compose d'un aimant unique, soumis à l'action directrice d'un champ magnétique uniforme, et d'une bobine de diamètre très grand par rapport à la longueur de l'aimant; le centre de suspension de l'aimant est sur l'axe de la bobine. Dans ces instruments, comme on l'a démontré (Chap. VIII, n° 3), les tangentes des angles de déviation sont proportionnelles aux intensités des courants qui produisent les déviations. Le meilleur modèle de boussole des tangentes se compose (*fig.* 101) de deux bobines circulaires disposées parallèlement et éloignées d'une distance égale à leur rayon. L'aimant, qui doit être court, a son centre

sur l'axe commun des bobines, au milieu de la distance qui les sépare.

Cette disposition a pour but d'éviter l'erreur produite par la

Fig. 101.



longueur sensible de l'aimant et par un léger défaut de coïncidence du centre de l'aimant et du centre de la bobine.

La déviation est observée à l'aide d'une aiguille indicatrice en verre, très légère, qui oscille au-dessus d'un limbe gradué.

8. On appelle *boussole des sinus* un galvanomètre, astatique ou non, formé d'un aimant soumis à l'action directrice d'un champ magnétique uniforme et d'une bobine qui peut tourner autour d'un axe passant par le centre de suspension de l'aimant. Sous l'influence du courant l'aimant est dévié, et si l'on fait tourner la bobine à la main jusqu'à l'amener dans un plan vertical parallèle à celui qui contient l'axe de l'aimant, les intensités des courants correspondant aux déviations θ et θ_1 sont entre elles comme $\sin\theta$ et $\sin\theta_1$; c'est ce qui résulte des considérations développées au Chapitre VIII (n° 3).

On parvient aisément à rendre la boussole des sinus beaucoup plus sensible que la boussole des tangentes; d'abord elle peut être astatique, et de plus sa bobine peut embrasser l'aimant et l'envelopper de très près. Mais la boussole des sinus est incommode dans un grand nombre de cas, parce qu'une mesure d'intensité avec cet instrument exige un temps plus long qu'avec tout autre galvano-

mètre : à chaque rotation du cadre, l'aimant dévie aussi en fuyant devant le cadre, et il faut de nombreux tâtonnements avant d'obtenir le parallélisme parfait du plan de la bobine et du plan vertical passant par l'axe de l'aimant. Ce parallélisme est atteint lorsqu'un repère établi sur le cadre vertical est amené juste au-dessous d'une aiguille indicatrice fixée à l'aimant. Une alidade à vernier, entraînée par la rotation de la bobine, se meut sur un cercle gradué, et l'on observe l'angle dont il a fallu tourner la bobine pour passer de la position indiquée par le zéro du vernier, avant l'expérience, à la nouvelle position indiquée par le zéro quand un courant circule dans l'intérieur de la bobine.

Cette observation est susceptible d'une grande exactitude. Le cadre est en général mis en mouvement par une vis micrométrique tangente aux bords du cercle.

9. La forme de la bobine d'un galvanomètre n'est pas sans importance; il peut arriver que la bobine soit trop large et trop aplatie ou trop étroite pour produire le maximum d'intensité de champ magnétique que peut fournir une longueur déterminée de fil enroulé sur le cadre. Pour un fil de longueur et de diamètre connus, il y a toujours une forme de cadre répondant au maximum d'effet. Cette forme n'a été calculée que pour la simple bobine circulaire employée dans le galvanomètre à miroir.

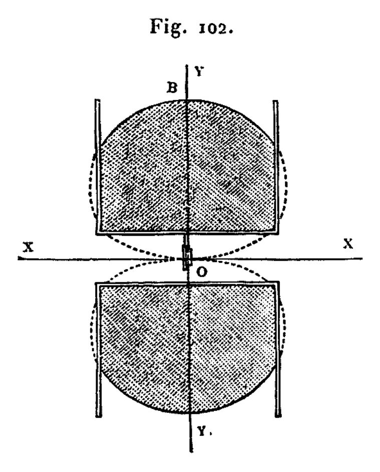
La courbe qui figure la section de la bobine dans sa forme la plus avantageuse est donnée par l'équation suivante, due à sir William Thomson :

$$x^2 = (a^2 y)^{\frac{3}{2}} - y^2,$$

dans laquelle x est l'abscisse mesurée sur l'axe de la bobine et y l'ordonnée perpendiculaire à cet axe; a représente la distance OB; l'origine des coordonnées est le centre de la bobine, c'est-à-dire le point de suspension de l'aimant. La *fig.* 102 montre la courbe représentée par cette équation, ainsi qu'une section longitudinale d'une bobine construite d'après ces principes. Une portion de la surface enfermée par la courbe, dans le voisinage de l'aimant, est nécessairement vide de fil et non utilisée, afin de permettre à l'aimant de se mouvoir avec liberté. Dans la pratique, on se rapproche

de la forme la plus avantageuse en prenant une bobine dont les dimensions relatives sont celles indiquées sur la figure, et en remplissant de fil les parties traversées par des hachures.

Fig. 102.



Pour obtenir le meilleur effet, le fil ne doit pas avoir la même grosseur sur toute son étendue; sa section transversale doit croître avec le diamètre de la bobine de telle sorte qu'elle soit en chaque point proportionnelle à ce diamètre : la résistance de chaque tour de fil devient alors constante. En pratique, il est impossible de se conformer rigoureusement à cette règle : on se contente d'adopter trois ou quatre grosseurs différentes de fil pour former la bobine, procédé facile qui fournit de bons résultats.

10. Sir William Thomson a donné le nom de *galvanomètre gradué* à un instrument construit d'après les règles précédentes et pourvu en outre (*fig.* 103) d'un bras ou levier *ca* mobile sur un pivot *c*; au moyen de ce levier on peut mettre la borne *t* en communication avec l'une quelconque des bornes marquées 1, 2, 3, 4, et comprendre ainsi dans le circuit du galvanomètre soit la totalité du fil dont il est formé, soit $\frac{3}{4}$ ou $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{4}$ de ce fil. On peut ainsi n'employer dans chaque cas que la portion la plus efficace du fil pour le degré de sensibilité dont on a besoin. La sensibilité

relative correspondant à chacun de ces circuits partiels se détermine aisément par l'expérience et est constante.

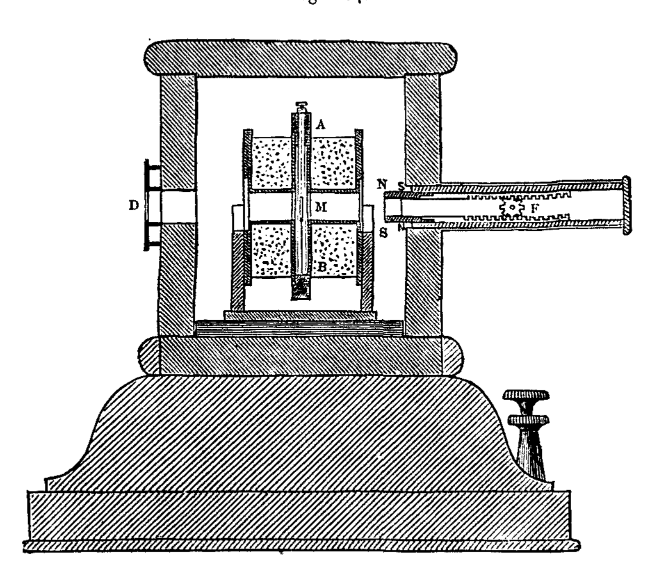
Fig. 103.

11. Sir William Thomson a donné le nom de *galvanomètre à battement amorti* à un galvanomètre à miroir qui présente les particularités suivantes : 1° le miroir est très léger; 2° quatre petits aimants sont appliqués au dos du miroir au lieu d'un aimant unique de même poids; 3° la petite chambre où se meut le miroir a juste la largeur nécessaire pour permettre au miroir de tourner sur lui-même; 4° les parois antérieure et postérieure de cette chambre sont assez rapprochées pour jouer le rôle de borne-arrêt en empêchant le miroir de dévier au delà de l'angle qui transporte la tache lumineuse à l'une des extrémités de l'échelle. Mais dans les conditions habituelles le miroir ne vient pas buter contre ces arrêts. Avec des instruments ainsi construits, la tache lumineuse se déplace d'une manière continue et atteint du premier coup et sans oscillation sa déviation finale, l'impulsion primitive étant contenue par la viscosité de l'air. Le même effet est réalisé dans quelques appareils, mais beaucoup moins parfaitement, en plaçant sur le prolongement de la suspension une petite lame, de matière légère, qui fait l'office de volant. Ce volant est quelquefois plongé dans l'eau. M. Varley a construit des galvanomètres dans lesquels la chambre contenant l'aimant et le miroir est remplie d'eau.

12. Le *galvanomètre marin*, dont les *fig.* 104 et 105 montrent une coupe et un plan, est un galvanomètre construit spé-

cialement pour les expériences qui se font à bord des navires; il faut que ni le mouvement du vaisseau ni son changement de direction ne produise sur l'appareil aucune déviation sensible. Ce résultat a été obtenu par sir William Thomson de la manière suivante. L'aimant et le miroir d'un galvanomètre à miroir sont fixés sur un faisceau de fils de soie tendus entre A et B (*fig.* 104).

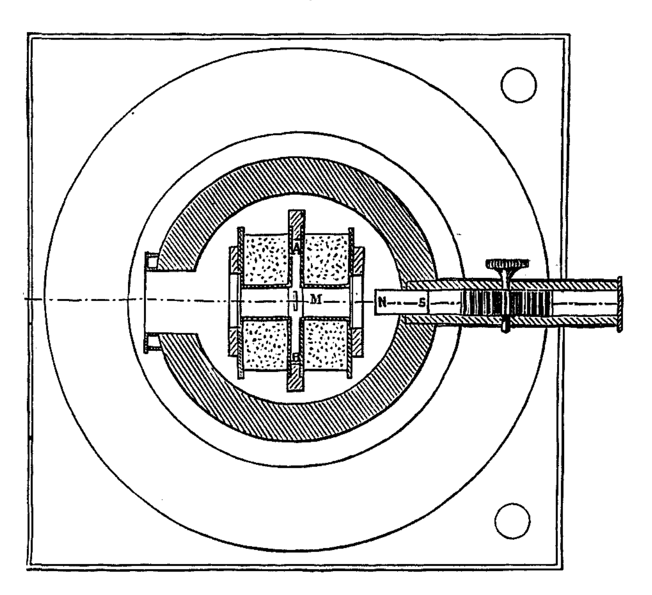
Fig. 104.



L'axe de suspension passe par le centre de gravité du système. Un aimant puissant en fer à cheval, jouant le rôle d'aimant directeur, embrasse la bobine; cet aimant, qui n'est pas indiqué sur la figure, doit exercer sur l'aiguille une force directrice supérieure à celle de la terre. L'action de la terre est d'ailleurs notablement affaiblie par une enveloppe de fer doux qui recouvre complètement l'appareil, à l'exception de la petite fenêtre D destinée à livrer passage aux rayons de lumière incidents et réfléchis sur le miroir. Un aimant de réglage NS est mis en mouvement à l'aide d'une crémaillère et d'un pignon denté.

13. Le *galvanomètre différentiel* est formé de deux bobines égales et associées de telle sorte que l'aimant ne subisse aucune déviation si le même courant ou des courants de même intensité les traversent en sens contraires. L'effet de l'une des bobines est complètement neutralisé par l'effet de l'autre. On construit très aisément un galvanomètre différentiel en enroulant simultanément sur la bobine


Fig. 105.

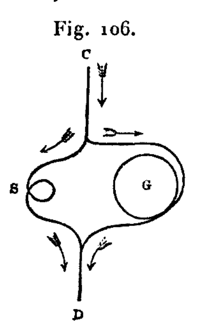


deux fils identiques. Ces deux fils sont quelquefois assemblés en forme de ruban ou contournés en tresse et réunis à l'aide de la soie qui sert à les isoler. On vérifie très aisément la parfaite égalité des champs magnétiques engendrés par les deux bobines; en effet, dans le cas où les champs sont égaux, le courant issu d'une pile et circulant d'abord dans la première bobine, puis dans la seconde en sens contraire, ne devra produire aucune déviation de l'aiguille, quelle que soit l'intensité de ce courant. Le plus souvent on constatera une faible déviation; mais on la fera disparaître en ajoutant quelques tours de fil à la bobine moins énergique. Si, après cette

addition, la résistance de l'une des bobines est supérieure à celle de l'autre, on peut ajouter à la bobine de moindre résistance un fil d'une certaine longueur et le placer extérieurement dans une position telle qu'il n'exerce aucune action sur l'aiguille. L'instrument est alors parfaitement réglé. Le galvanomètre différentiel est un appareil très utile, comme on le verra plus tard, pour la comparaison des résistances. Quelquefois on prend pour les bobines du fil en argent allemand au lieu de fil de cuivre; la résistance de l'argent allemand est beaucoup plus grande que celle du cuivre, mais elle varie beaucoup moins avec les changements de température. Dans les galvanomètres différentiels destinés à servir sur les circuits de grande résistance, la résistance totale des bobines est un élément de médiocre importance; c'est l'égalité de résistance des deux bobines conjuguées qu'il est essentiel de réaliser.

14. La sensibilité d'un galvanomètre peut être variée à volonté et d'une manière très simple, à l'aide d'une dérivation appelée *shunt*. On donne ce nom à une *bobine de résistance*, c'est-à-dire à une bobine de fil fin, qui sert à dériver une portion définie d'un courant entre les bornes d'un galvanomètre et l'empêche ainsi de traverser les bobines de l'appareil. Appelons G (*fig.* 106) les bobines du galvanomètre et S le shunt, et supposons que la résistance du shunt soit $\frac{1}{9}$ de la résistance du galvanomètre; sur la totalité du courant qui passe de C en D, 9 parties traversent le shunt et deviennent sans action sur l'aiguille; 1 partie seulement circule à travers le galvanomètre. Dans ces conditions, le $\frac{1}{10}$ seulement de l'intensité totale du courant est efficace pour produire la déviation de l'aiguille; et cette déviation (en supposant qu'on emploie un galvanomètre à miroir) est seulement le $\frac{1}{10}$ de celle qu'on aurait observée si l'on n'avait pas employé le shunt. De même, en attribuant au shunt une résistance égale à $\frac{1}{99}$ de celle du galvanomètre, on réduira la sensibilité de l'instrument à la centième partie de sa sensibilité première. La plupart des galvanomètres actuellement employés pour mesurer l'intensité des courants sont pourvus de

Fig. 106.



shunts dont la résistance est équivalente à $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ de celle du galvanomètre ; à l'aide de ces shunts, la sensibilité de l'instrument peut être réduite respectivement à $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$ de sa valeur primitive.

Les shunts doivent être formés du même métal que les bobines du galvanomètre, et de plus ils doivent être intercalés dans le circuit de manière à se trouver sensiblement à la même température que l'instrument.

Soient S la résistance du shunt, G celle du galvanomètre, d la déviation sans le shunt, d_1 la déviation avec le shunt ; on a la relation générale

$$\frac{d}{d_1} = \frac{G + S}{S} \tag{1}$$

pour un courant total d'intensité constante et en supposant que les déviations indiquées par l'instrument sont proportionnelles aux intensités des courants.

En effet, I et i_1 étant les intensités du courant correspondant aux déviations d et d_1, on a

$$\frac{I}{i_1} = \frac{d}{d_1}.$$

Or on sait que les intensités i_1 et i'_1 dans les dérivations G et S sont en raison inverse des résistances ; donc

$$\frac{i'_1}{i_1} = \frac{G}{S};$$

d'où

$$\frac{i'_1 + i_1}{i_1} = \frac{I}{i_1} = \frac{G + S}{S} = \frac{d}{d_1}.$$

Il ne faut pas oublier que l'introduction d'un shunt a toujours pour effet de diminuer la résistance du circuit ; par suite, à moins que cette résistance ne soit assez grande pour que la résistance propre du galvanomètre n'en forme qu'une fraction insignifiante, les déviations ne seront pas altérées suivant la proportion indiquée par la formule (1). Le rapport des déviations d et d_1 est donné

par la formule suivante dans le cas le plus général. Soit R la résistance du circuit, non compris le galvanomètre; $R + G$ est la résistance totale sans le shunt, et $R + \frac{GS}{G+S}$ est la résistance totale avec le shunt. En désignant par I et I' les intensités du courant total dans ces deux circuits distincts, on aura, la force électromotrice restant constante, la relation

$$\frac{I}{I'} = \frac{R + \frac{GS}{G+S}}{R+G}.$$

Il résulte de ce qui précède que

$$\frac{I'}{i_1} = \frac{G+S}{S},$$

et que

$$\frac{I}{i_1} = \frac{d}{d_1}.$$

On déduit de ces égalités

$$\frac{d}{d_1} = \frac{R(G+S)+GS}{(R+G)S}.$$

15. Les galvanomètres destinés à servir sur des circuits de résistance extrêmement faible consistent quelquefois en un simple anneau formé d'un gros fil de cuivre. La pile qu'il convient d'employer avec un pareil galvanomètre ne doit avoir elle-même qu'une très faible résistance intérieure; autrement, on n'observerait aucune déviation. Un élément de Grove (Chap. XV, nº 14), à larges plaques fournit un courant qu'il est possible de reconnaître au moyen d'un galvanomètre formé d'un simple anneau. Les galvanomètres qui sont destinés aux expériences thermo-électriques doivent avoir une résistance propre très faible; souvent ils se composent de 20 ou 30 tours d'un fil dont le diamètre est d'environ $0^{mm},9$; la résistance de ces galvanomètres peut descendre au-dessous de $\frac{1}{4}$ ohm. Les galvanomètres destinés à servir sur des circuits de grande résistance sont souvent formés d'un fil de $0^{mm},3$ et même de $0^{mm},1$ de diamètre; la résistance de ces galvanomètres atteint fréquemment 8000 ohms. Or, un fil de cuivre de $0^{m},50$ de longueur et $0^{mm},1$ de

diamètre représente à peu près une résistance de 1 ohm ; la résistance précédente équivaut donc à 4000^{m} de ce fil de cuivre.

La résistance du galvanomètre est en elle-même un inconvénient ; mais il est impossible d'accumuler un grand nombre de tours de fil dans un petit espace sans que le circuit ainsi formé acquière une grande résistance. Il faut prendre soin que chaque circonvolution du fil soit parfaitement isolée de sa voisine. Cette précaution est de grande importance ; car, si deux circonvolutions sont en contact direct ou en communication à travers la soie qui les enveloppe, elles se trouvent, comme on dit techniquement, *en court circuit*, et le courant cesse de traverser les tours de fil intermédiaires dont l'effet sur l'aiguille est ainsi perdu. Sans qu'il y ait effectivement contact métallique entre les circonvolutions du fil, il peut arriver que l'isolement soit imparfait et mal assuré. C'est le pire défaut qu'un galvanomètre puisse présenter : sa résistance devient incertaine et variable ; les shunts ne peuvent plus être considérés comme égaux à des fractions définies de la résistance, et l'instrument n'est désormais d'aucune utilité pour les observations précises. Il faut non seulement que le fil isolé de la bobine soit parfaitement recouvert de soie, mais encore qu'il soit passé au four et complètement desséché avant d'être enroulé en bobine ; puis, après avoir mis en place quelques couches de fil, on passe de nouveau la bobine au four et on la plonge ensuite dans un bain de paraffine pure. Quand la bobine est entièrement garnie, on la passe une dernière fois au four et l'on compare sa résistance avec celle que le calcul fournit pour la longueur de fil enroulée.

Le moindre contact entre les deux circuits d'un galvanomètre différentiel est évidemment un défaut radical. Lorsque deux ou plusieurs circuits distincts sont montés sur la même bobine, comme il arrive souvent, ces circuits doivent être isolés avec le plus grand soin. De graves erreurs dans les essais ont eu pour cause un mauvais isolement entre des circuits différents ou entre diverses parties d'un même circuit.

CHAPITRE XIV.

ÉLECTROMÈTRES.

1. Les électromètres servent à indiquer la présence d'une charge d'électricité statique par la force d'attraction ou de répulsion qui se manifeste entre deux corps conducteurs voisins. Cette force dépend de la quantité d'électricité dont les conducteurs sont chargés, et par suite de la différence de leurs potentiels; on peut donc dire qu'un électromètre est un instrument destiné à mesurer les différences de potentiel. On l'emploie souvent pour reconnaître simplement la présence de l'électricité, mais il ne fournit pas directement la mesure de la quantité; et si quelquefois il sert à comparer des charges électriques, ce n'est que dans des cas particuliers où les différences de potentiel produites entre les deux conducteurs sont proportionnelles aux quantités d'électricité contenues sur les corps avec lesquels un des conducteurs de l'électromètre est successivement chargé.

Nous avons déjà décrit les électroscopes ordinaires à répulsion qu'on appelle *électroscope à balle de sureau* ou *de Canton; électroscope à feuilles d'or* ou *de Bennet; électroscope de Peltier*. L'électroscope de *Bohnenberger,* qui consiste en une feuille d'or suspendue entre deux boutons symétriquement disposés et maintenus l'un à un potentiel positif et l'autre à un potentiel négatif de même valeur absolue, appartient à une catégorie différente d'instruments auxquels sir William Thomson a donné le nom d'*électroscopes hétérostatiques.* Ce sont des appareils où l'on fait inter-

venir avec avantage, outre l'électrisation que l'on étudie, une autre électrisation indépendante de la première. Dans l'appareil de Bohnenberger, l'électrisation indépendante, qui maintient entre les deux boutons une différence de potentiel constante, est produite par une espèce de pile appelée *pile sèche;* cette pile est formée par des plaques minces de deux métaux soudés ensemble et ces couples sont séparés par des lames de papier contenant une matière déliquescente qui les conserve légèrement humides. Quelquefois ces plaques sont remplacées par des poussières métalliques adhérentes au papier. Tant que la feuille d'or n'est électrisée ni positivement ni négativement, elle n'est attirée ni à droite ni à gauche; si on l'électrise positivement, elle dévie vers le bouton négatif, et *vice versâ.*

On a modifié heureusement l'électroscope de Bohnenberger en donnant (*fig.* 107) la charge hétérostatique à la feuille d'or et non plus aux deux corps symétriquement disposés A et B. S'il existe une différence de potentiel entre A et B, elle est alors indiquée par l'attraction de la feuille d'or qui se porte d'un côté ou de l'autre. Plus le potentiel de la feuille d'or est élevé, plus l'instrument est sensible. On maintient très aisément la feuille d'or à un haut potentiel en la mettant en communication avec une bouteille de Leyde.

2. L'électromètre hétérostatique le plus parfait qui ait été construit jusqu'à ce jour est l'*électromètre à quadrants* de sir W. Thomson. Dans cet instrument, la feuille d'or de Bohnenberger est remplacée par une aiguille en aluminium plate et très mince u, représentée en plan dans la *fig.* 108 et en élévation (à une échelle moindre) dans la *fig.* 109. Cette aiguille s'épanouit à chaque extrémité en une sorte d'ailette indiquée par un trait pointillé (*fig.* 108); un fil S, fixé à une tige isolante q, maintient l'aiguille suspendue dans l'intérieur d'une bouteille de Leyde. Cette bouteille contient une certaine quantité d'acide sulfurique concentré qui forme son armature intérieure; un fil Z, tendu par un poids, relie l'aiguille à cette armature.

Un miroir, caché dans la *fig.* 109 par un abri métallique t, est fixé à l'aiguille u par une tige rigide. Ce miroir sert, comme dans le galvanomètre réflecteur, à indiquer la déviation de l'aiguille u

par le déplacement de l'image réfléchie d'une lampe sur une échelle graduée. L'aiguille u est suspendue dans l'intérieur de quatre quadrants a, b, c et d isolés par des tiges en verre i, i_1 ; le quadrant a

Fig. 107.

Fig. 109.

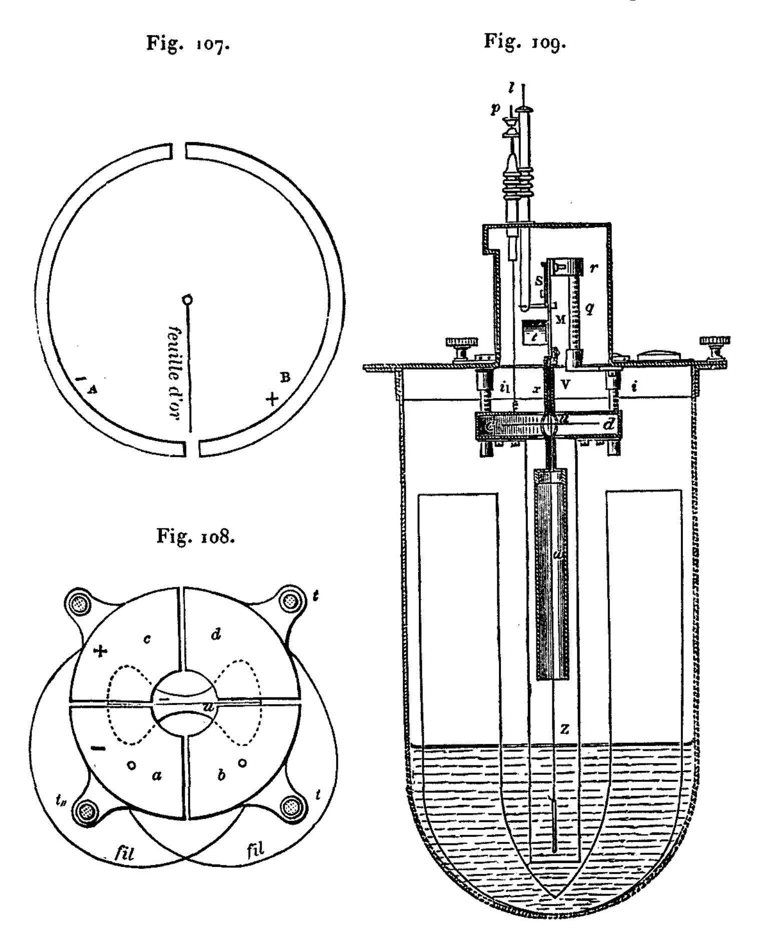


Fig. 108.

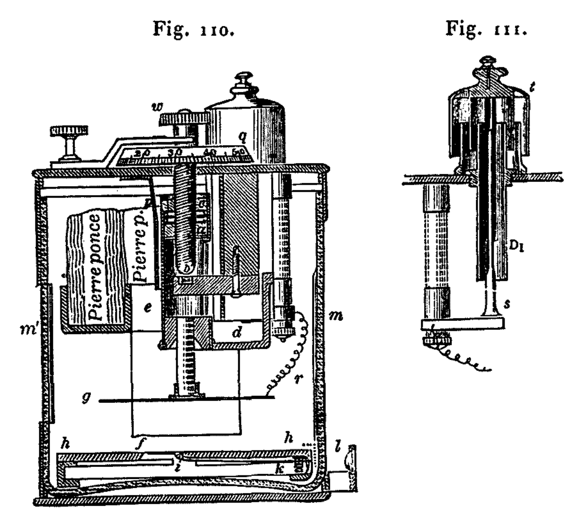
est en communication électrique avec d; c est en communication électrique avec b; cette disposition se voit en plan sur la *fig.* 108. Au-dessus et au-dessous des quadrants, deux manchons V et u_1, au même potentiel que u, protègent l'aiguille et les fils qui communi-

quent avec elle contre toute autre induction que celle produite par les quadrants *a*, *b*, *c*, *d*. Ces quadrants remplacent les corps représentés sous une forme simplifiée en A et B dans la *fig*. 107. Supposons que *u* soit chargé à un potentiel négatif élevé ; si les quadrants se trouvent alors placés symétriquement par rapport à l'aiguille, celle-ci ne dévie ni à droite ni à gauche, tant que *a* et *c* sont au même potentiel. Si *c* est positif par rapport à *a*, l'extrémité de *u* qui se trouve au-dessous des quadrants *c* et *a* est repoussée de *a* vers *c*, et en même temps l'autre extrémité de l'aiguille *u* est repoussée de *d* vers *b*. Ce mouvement de l'aiguille est indiqué par le mouvement de la tache lumineuse réfléchie par le miroir. D'ailleurs le champ de force, produit à l'intérieur des quadrants, est sensiblement uniforme dans le plan même de la fente étroite qui les sépare, en sorte que la déviation est sensiblement proportionnelle à la différence de potentiel qui existe entre *a* et *c*. Le nombre de divisions que la tache lumineuse parcourt sur l'échelle exprime donc en une unité de mesure arbitraire la différence de potentiel qui existe entre *a* et *c* ; on voit que cet instrument est un éléctromètre et non un simple électroscope. Deux tiges *p*, dont l'une seulement est visible dans la figure, servent à charger *a* et *c* ; on peut les soulever de façon qu'elles ne soient plus en contact avec ces quadrants après qu'ils ont été chargés. Une troisième tige *l* sert à charger la bouteille de Leyde. En temps ordinaire cette tige ne reste pas en communication avec l'armature intérieure ; on la tourne sur elle-même, pour rompre le contact de la languette M avec la pièce métallique reliée au fil S et placée derrière lui.

Lorsque le flacon est d'un verre de bonne qualité, soigneusement lavé dans l'eau distillée et ensuite desséché avant d'être rempli d'acide sulfurique, la bouteille de Leyde peut avoir un bon isolement pour ne perdre que $\frac{1}{4}$ pour 100 de sa charge par jour. Sir W. Thomson dispose dans l'intérieur de la bouteille une petite machine électrique à induction, qui sert à augmenter ou à diminuer la charge à volonté, et une jauge au moyen de laquelle la constance de la charge peut être vérifiée. Il est possible de rendre un instrument de ce genre assez sensible pour que la différence de potentiel entre le zinc et le cuivre donne une déviation de 100 divisions.

3. Les parties essentielles de l'*électromètre portatif* de Thomson sont représentées dans la *fig.* 110. En g est un disque plat et isolé

Fig. 110. Fig. 111.



qui reçoit la charge à mesurer ; h est un second disque isolé, pourvu en son centre d'une ouverture que remplit une plaque très légère d'aluminium f; cette plaque est soutenue par un fil horizontal tendu ii et porte une aiguille indicatrice qui s'étend au-dessous du disque h. La plaque et le fil sont représentés dans la *fig.* 57. Si g et h sont au même potentiel, il n'y a pas de charge sur les faces qui se regardent, et f n'est ni attiré ni repoussé par g. Si une charge d'électricité est communiquée à g ou h de façon que leurs potentiels diffèrent, f est attiré ou repoussé par g, et le mouvement produit peut être estimé en observant en l, avec une loupe, la position d'un petit cheveu fixé à l'aiguille indicatrice. Toutefois, comme les forces en jeu sont très petites, à moins que les charges de g et h ne soient très grandes, cette disposition offrirait peu d'avantages. La sensibilité de l'appareil est énormément accrue au moyen de l'artifice suivant : on donne à la plaque h une charge fixe considérable en la maintenant en communication permanente avec une bouteille de Leyde fortement chargée et parfaitement isolée. Si g est alors relié à la terre, une charge est induite sur cette plaque et f est attiré

vers g avec une force très sensible. Supposons que le fil ii soit tordu de manière à abaisser la plaque f, c'est-à-dire à relever le cheveu à l'extrémité l; il y aura, pour une valeur déterminée du potentiel de h, un écart des deux plaques g et h tel que l'attraction électrique fera exactement équilibre à la torsion du fil. La distance de la plaque g à la plaque h est réglée dans cet instrument par une vis micrométrique; et la position relative de la plaque g est observée sur une échelle divisée, à l'aide d'un vernier. Supposons maintenant qu'on rompe la communication de g avec la terre et qu'on relie cette plaque au corps A dont on veut déterminer le potentiel par rapport à celui de la terre : l'induction détermine sur g une charge proportionnelle à la différence des potentiels de h et de A. Si le potentiel de A est positif, comme celui de h, la nouvelle charge est moindre que celle qui correspond au potentiel de la terre, et il faut abaisser la plaque g pour amener à son point de repère le cheveu en l. Si au contraire A a un potentiel négatif, la charge est plus grande que celle qui est fournie par le potentiel de la terre, et pour ramener le cheveu au repère il faut soulever g. La différence de potentiel U entre le corps A et la terre est proportionnelle à la variation de distance des plateaux g et h, lorsque g est mis tour à tour en communication avec la terre et avec le corps A. En effet, d'après le n° 7 du Chapitre V, la force attractive exercée entre les plaques g et h est représentée par la formule $f = \frac{V^2 S}{8\pi a^2}$, où V désigne la différence de potentiel des deux plaques, S leur surface en regard et a la distance qui les sépare. Lorsque le cheveu est amené au point de repère, la force attractive f équilibrée par la torsion du fil est constante, et par suite le rapport $\frac{V}{a}$ doit être aussi constant. Ainsi la différence de potentiel est proportionnelle à la distance qu'il faut établir entre les deux plateaux pour équilibrer, dans chaque expérience, la réaction constante due à la torsion du fil. Soient a et a' les distances de la plaque g à la plaque h dans les deux expériences successives, V et V' les différences de potentiel entre la plaque h et la plaque g reliée d'abord au sol, puis au corps A; on en conclut l'égalité de rapports

$$\frac{V}{a} = \frac{V'}{a'} = \frac{U}{a - a'}.$$

Le potentiel relatif U du corps A est de même signe que la différence $a - a'$.

Chaque millimètre d'écartement entre les deux plaques correspond donc, pour une valeur déterminée du potentiel de la plaque *h*, à une différence de potentiel définie et constante. Supposons que la plaque *g*, reliée au corps A, ait besoin d'être soulevée de 1^{mm} au-dessus de la position normale qu'elle occupe quand elle est reliée à la terre, et que la même plaque, communiquant avec un second corps B, doive être élevée de 10^{mm} au-dessus de la même position; on en conclura que le potentiel de B est 10 fois plus fort que celui de A, ces potentiels pouvant d'ailleurs être tous deux supérieurs ou inférieurs à celui de la terre. En communiquant dans chaque cas à *h* un potentiel très élevé, la distance *a* des deux plaques, pour une force attractive constante, peut devenir aussi relativement très grande, et l'on aura le double avantage d'une échelle de mesure très étendue et d'une extrême sensibilité.

La plaque *h* forme une partie de l'armature intérieure d'une bouteille de Leyde dont la paroi en verre est indiquée par *mm'*; la vis micrométrique *b* sert à élever ou à abaisser la plaque isolée *g* par l'intermédiaire d'un curseur à coulisse qu'il n'est pas nécessaire de décrire ici en détail. La position de *g* est observée sur une échelle verticale non représentée sur la figure; cette échelle est subdivisée à l'aide d'un cercle micrométrique *q*; la plaque *g* est reliée à une tige *s* (*fig.* 111), qui sort de la bouteille de Leyde par une ouverture ménagée dans le couvercle. Cette tige sert à charger la plaque *g* et est ordinairement recouverte d'un étui *t* d'une forme particulière, destiné à empêcher l'entrée ou la sortie de l'air. Quand l'instrument n'est pas en expérience, l'étui *t* est abaissé et ferme complètement la bouteille de Leyde. Lorsqu'on se sert de l'instrument, l'étui *t* est relevé, et, comme il est alors parfaitement isolé, il fait l'office de borne et sert à charger la plaque *g*. On dispose dans l'intérieur de la bouteille de Leyde une boîte en plomb contenant de la pierre ponce imbibée d'acide sulfurique pour dessécher l'air. La bouteille de Leyde peut se charger au moyen d'une tige isolée, qu'on introduit par une petite ouverture pratiquée à cet effet dans le couvercle du flacon. La bouteille une fois chargée, on ferme cette ouverture avec une vis. En choisissant un verre con-

venable, bien lavé à l'eau distillée et desséché par évaporation au feu avant la fermeture définitive, la bouteille de Leyde ne perdra pas par jour $\frac{1}{4}$ pour 100 de sa charge. On aura soin de retirer la pierre ponce une fois par mois et de la raviver au four; sans cette précaution, l'acide sulfurique, dilué par la vapeur d'eau qu'il a fixée, déborderait et détériorerait les pièces de l'instrument. On peut constater avec cet appareil la différence de potentiel produite par le contact du zinc et du cuivre et mesurer avec une grande exactitude la force électromotrice de 20 ou 30 éléments Daniell. La valeur de chaque division de l'instrument varie avec la charge de la bouteille de Leyde. Cet appareil n'est pas un électromètre absolu, mais il sert à comparer la valeur des potentiels comme les galvanomètres servent à comparer l'intensité des courants; il est spécialement propre aux expériences qui ont pour objet de déterminer le potentiel de l'atmosphère. Si une mèche allumée est fixée à la tige s, la plaque g est rapidement amenée au potentiel que l'air possède à l'endroit où la mèche brûle. On tient l'instrument dans une main; on observe à la loupe la position du cheveu en l par rapport au point de repère et on ajuste la plaque g en faisant tourner la tête de la vis w. Le constructeur doit donner au fil une torsion telle que la plaque f soit en équilibre stable quand l est au point de repère. Lorsqu'on donne une très faible torsion initiale, la force directrice, qui tend à ramener le fil, varie très rapidement à mesure que grandit l'angle dont le fil est détourné par suite de l'attraction ou de la répulsion exercée sur la plaque f, et l'équilibre est alors très stable. Si l'on donne au fil une torsion initiale un peu grande, on diminue la variation de la force directrice correspondant à un même écart du cheveu hors des repères, et l'équilibre peut aisément être rendu tout à fait instable. La torsion attribuée originairement au fil doit être un peu moindre que celle qui donne l'équilibre instable pour la limite inférieure des positions occupées par la plaque g dans le cours des expériences.

4. L'électromètre absolu est un appareil ressemblant beaucoup à l'électromètre portatif, mais de dimension plus grande et disposé de façon que la force agissant sur le disque mobile puisse être mesurée directement en unités absolues. En appelant V et V_1 les deux

différences de potentiel qui correspondent à la même force F pour les distances D et D_1 entre les deux plaques parallèles, et en désignant par S la surface de la plaque mobile en centimètres carrés, on a

$$V - V_1 = (D - D_1)\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}.$$

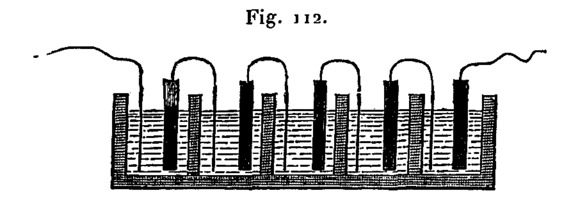
Cette équation fournit la différence de potentiel $V - V_1$ en unités électrostatiques absolues ; au moyen de mesures de ce genre on peut déterminer les coefficients constants qui servent à convertir les indications d'un électromètre à quadrants ou portatif en mesures absolues.

CHAPITRE XV.

PILES ÉLECTRIQUES.

1. Parmi toutes les formes employées dans la pratique, l'élément de pile le plus simple se compose d'une plaque de zinc et d'une plaque de cuivre, plongées toutes deux dans de l'eau légèrement acidulée par l'addition d'une petite quantité d'acide sulfurique. Les plaques de zinc et de cuivre sont en général soudées ensemble deux à deux, et disposées dans une longue auge en grès ou verre (*fig.* 112),

Fig. 112.



qui est divisée par des cloisons en compartiments distincts. Pour rendre cette pile plus facile à transporter, on remplit chacun de ces compartiments ou éléments avec du sable, qui maintient fixes les plaques et empêche le liquide de se répandre en dehors de l'auge quand on veut la déplacer. Ce modèle est appelé la *pile ordinaire à sable*. La plaque de cuivre est avantageusement remplacée par une plaque de platine ou d'argent platiné; la pile ainsi composée et non garnie de sable est connue sous le nom de *pile de Smée*. La surface rugueuse du dépôt de platine a pour effet de diminuer la

polarisation. La *fig.* 113 représente la forme ordinaire d'un élément

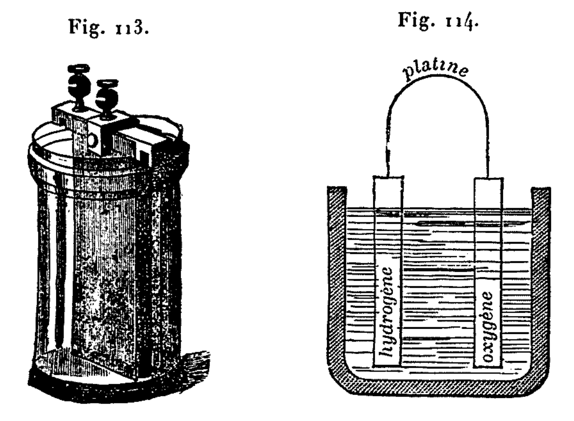


Fig. 113. Fig. 114.

Smée; la lame d'argent platiné est fixée à une traverse en bois, entre deux plaques de zinc amalgamé; les bornes de laiton servent à assujettir ensemble les trois plaques.

Dans la pile de *Walker*, le cuivre est remplacé par du graphite.

2. Les conditions principales auxquelles doit satisfaire un élément de pile sont les suivantes :

1° Il doit produire une grande force électromotrice.

2° Il doit avoir une résistance intérieure faible et constante.

3° Sa force électromotrice doit rester constante, qu'il soit employé à produire un courant énergique ou un courant de faible intensité.

4° Les substances qui entrent dans sa composition doivent être à bon marché.

5° Ces substances ne doivent être consumées que lorsque la pile est en activité.

6° La forme de l'élément doit être telle qu'on puisse aisément examiner son état et ajouter au besoin de nouvelles substances pour régénérer la pile.

Aucune pile ne peut réunir tous ces avantages au plus haut degré, et les conditions particulières de chaque expérience doivent nous

guider dans le choix du genre de pile qui doit être préféré pour un but défini.

3. Un élément à un seul liquide ne peut produire une force électromotrice constante à cause de la polarisation des plaques (Chap. IV, n° 9). La force électromotrice due aux métaux dans les piles qu'on vient de décrire diminue avec une rapidité extraordinaire aussitôt que les pôles sont réunis, surtout si le courant qui s'en échappe a une intensité considérable. Cette diminution est due à une force électromotrice de sens contraire, qui résulte principalement de la présence d'hydrogène libre sur la plaque de cuivre ou de platine. Pour reconnaître que les gaz ont en effet la propriété de développer une force électromotrice, on peut se servir du voltamètre (*fig.* 41). Supposons que les fils A et B, après que la décomposition de l'eau a été effectuée, soient réunis en un circuit comprenant la bobine d'un galvanomètre; il se manifeste aussitôt un courant, de sens contraire à celui qui provoquait la décomposition de l'eau, et par conséquent dirigé de l'hydrogène vers l'oxygène à travers le liquide; en même temps l'oxygène et l'hydrogène précédemment séparés se combinent pour former de l'eau. Le courant de cette pile à gaz a la direction même du courant qui se produirait si l'hydrogène était une électrode métallique négative et l'oxygène une électrode positive (*fig.* 114). Pourvu que l'oxygène et l'hydrogène n'aient aucune affinité chimique pour le métal avec lequel ils sont en contact, ce dernier n'exerce aucun effet sur la force électromotrice de l'élément à gaz; l'hydrogène joue le rôle de la plaque de zinc en s'unissant à l'oxygène de l'eau, et l'hydrogène de l'eau mis en liberté apparaît à l'électrode positive, qui est ici l'oxygène, et se combine avec lui.

Ce fait de la recomposition de l'hydrogène et de l'oxygène réunis par un conducteur métallique, tandis que ces gaz ne se recombinent pas s'ils sont simplement en présence l'un de l'autre, est probablement dû à la force électromotrice qui se développe à la surface de contact des métaux et des gaz. Ainsi, au contact du platine, l'hydrogène devient positif, et l'oxygène moins positif que l'hydrogène ou même négatif; en d'autres termes, la différence de potentiel développée par les contacts tend à produire un courant dirigé

de l'électrode hydrogène à l'électrode oxygène à travers l'eau, et ce courant décomposerait l'eau en transportant l'hydrogène à l'électrode oxygène et l'oxygène à l'électrode hydrogène. Le résultat est que la force qui produit la décomposition de l'eau est équilibrée par la tendance à la recomposition aux électrodes, et les gaz sont absorbés peu à peu. On sait que, d'après la théorie de la dissipation de l'énergie, la totalité du gaz ne peut être ainsi absorbée. L'explication précédente de l'action des gaz repose certainement sur une hypothèse incomplète ou inexacte. Si cette hypothèse était vraie, la force électromotrice de l'élément à gaz ou des plaques de platine polarisées serait toujours la même; au contraire, elle devient beaucoup plus grande lorsque la décomposition de l'eau a été effectuée par une force électromotrice considérable, et elle diminue peu à peu à mesure que s'effectue la recomposition des gaz, ainsi qu'on pouvait le prévoir d'après la théorie de la dissipation de l'énergie.

La force électromotrice engendrée par le dépôt des gaz sur les électrodes est, dans certaines limites, proportionnelle à la force électromotrice qui a produit ce dépôt. On le constate aisément en donnant aux électrodes une forme telle que les gaz adhérents ne s'en détachent qu'avec difficulté, en prenant par exemple pour électrodes de petites surfaces métalliques enveloppées par un corps isolant, ce qu'on réalise en creusant dans l'enveloppe d'un fil recouvert de gutta-percha un trou qui mette à nu une petite étendue du métal. Peut-être pourrait-on concevoir simplement l'origine de cette force électromotrice élevée, se manifestant comme une réaction contre la force électromotrice qui a provoqué une décomposition rapide et abondante du liquide : on la considérerait comme due à la décomposition d'une file de molécules formant autant d'éléments à gaz disposés en série et imparfaitement isolés l'un de l'autre.

4. La pile à sable est la plus défectueuse de toutes les piles, au point de vue de la constance de la force électromotrice; la polarisation est plus grande dans cette pile que dans toute autre, parce que le gaz ne s'en échappe qu'avec difficulté. La pile ordinaire cuivre-zinc occupe l'avant-dernier rang dans l'ordre de démérite.

On peut augmenter considérablement à un moment quelconque la force électromotrice de cet élément, pendant qu'il est en activité, en enlevant mécaniquement avec une brosse les gaz qui recouvrent les métaux ou en agitant fortement la pile. L'élément Smée est préférable à l'élément zinc-cuivre; on a constaté en effet que l'hydrogène n'adhère pas à la fine poudre de platine déposée sur les plaques aussi fortement qu'au cuivre. La plaque de charbon ou de graphite de Walker accomplit une fonction analogue; elle facilite le dégagement de l'hydrogène libre.

Quand une de ces piles à un seul liquide est laissée quelque temps avec ses électrodes disjointes ou isolées de la terre, de telle sorte qu'aucun courant ne passe, la force électromotrice reprend graduellement son énergie primitive, par suite de la mise en liberté de l'hydrogène et de sa recomposition avec l'oxygène. Mais on peut restituer plus rapidement à la pile sa force électromotrice maximum en faisant passer à travers les éléments un courant dirigé en sens contraire de leur force électromotrice propre.

Dans certaines circonstances, les piles n'ont pas à fournir un courant permanent; c'est ce qui a lieu, par exemple, pour celles qui servent à mettre en jeu des sonneries dans les maisons ou sur les lignes de chemin de fer, et qui demeurent inactives pendant de longs intervalles de temps; on emploie encore aujourd'hui dans ce but des piles à un seul liquide, en raison de leur simplicité.

5. On a déjà expliqué de quelle manière l'électrolyte qui entre dans la constitution d'un élément de pile modifie, suivant la théorie du contact, la force électromotrice développée dans un circuit non fermé (Chap. II, n° 22). Quand le circuit est fermé, la même force électromotrice subsiste aussi longtemps que les surfaces en contact ne sont pas modifiées. Il est aisé de voir, d'après la théorie du contact, que des changements considérables peuvent résulter du phénomène appelé *polarisation*, c'est-à-dire du dépôt des substances apportées par l'électrolyse sur les surfaces métalliques. Si aucune modification de cette nature ne survient, le changement du potentiel à chaque surface de séparation est le même dans le circuit fermé que dans le circuit ouvert. Appelons E_1, E_2, E_3, ... les valeurs successives de la force électromotrice à chaque surface de

séparation; l'intensité du courant produit sera

$$I = \frac{\Sigma E}{\Sigma R},$$

où le symbole Σ indique qu'il faut faire la somme de toutes les valeurs successives de E et de R. Si un point quelconque o du circuit est amené au potentiel zéro, le potentiel d'un point quelconque a est égal à $\Sigma_o^a E + I \Sigma_o^a R$, où Σ_o^a indique la sommation des diverses valeurs de E et de R entre les points o et a. La valeur de E est prise positivement, quand le changement à la surface de séparation considérée augmente la différence de potentiel entre a et o.

D'autre part, dans le Chapitre XI (nº 8), a été exposée une autre théorie d'après laquelle la force électromotrice d'une pile peut se déduire simplement de l'action chimique accomplie dans l'élément. Pour que ces deux théories s'accordent, il faut qu'il existe une relation déterminée entre les forces électromotrices dues aux différents contacts dans le circuit et l'équivalent thermique des actions chimiques dans l'élément. Cette relation peut s'établir de la manière suivante. Considérons un élément à un seul liquide composé de trois substances C, A, Z, la substance A étant l'électrolyte; soient E_{CA}, E_{AZ} et E_{ZC} les trois forces électromotrices aux trois surfaces de séparation; nous aurons, d'après le paragraphe déjà cité,

$$E_{CA} + E_{AZ} + E_{ZC} = J \Sigma \theta \varepsilon,$$

où $\Sigma\theta\varepsilon$ représente la somme des quantités de chaleur dégagées ou absorbées par des réactions identiques à celles qui auraient lieu pendant l'unité de temps dans l'élément traversé par l'unité de courant.

On déduit de cette loi les conséquences suivantes :

1º La différence de potentiel entre deux métaux quelconques C et Z non en contact, plongés dans un élément à un ou plusieurs liquides, est égale à la différence $J\Sigma\theta\varepsilon - E_{ZC}$; ainsi la force électromotrice d'une combinaison quelconque, bien qu'elle puisse être calculée par la théorie du contact, dépend totalement en réalité de l'action chimique; car l'effet de l'électrolyte est simplement d'augmenter ou de diminuer la force électromotrice, due au

contact entre les métaux, de la quantité précisément nécessaire pour donner la force électromotrice déterminée par la théorie chimique.

2° Avec un électrolyte donné, les métaux peuvent être rangés en une série telle, que la force électromotrice développée entre deux métaux quelconques (dans un élément *incomplet*) soit égale à la différence de certains coefficients assignés à chaque métal dans la série. Ces coefficients peuvent être obtenus directement par l'expérience ou bien se déduire, pour des groupes de trois métaux, de la mesure des forces électromotrices dues aux trois combinaisons que forment avec l'électrolyte ces trois métaux pris deux à deux. Cette conséquence résulte de la théorie du contact, sans intervention de la théorie électrochimique.

3° Supposons que la force électromotrice d'un élément complet $C \mid A \mid Z \mid C$ soit connue, ainsi que celle d'un autre élément $F \mid A \mid Z \mid F$ qui ne diffère du précédent que par le métal extrême. La force électromotrice de l'élément $C \mid A \mid F \mid C$, formé du même électrolyte et des deux métaux extrêmes C et F, est égale à la différence des forces électromotrices des deux autres éléments.

En effet, la force électromotrice du premier élément est

$$E = C \mid A + A \mid Z + Z \mid C;$$

celle du second est

$$E' = F \mid A + A \mid Z + Z \mid F.$$

Retranchons membre à membre et remarquons que

$$-F \mid A = +A \mid F$$

et

$$Z \mid C - Z \mid F = F \mid C;$$

il vient

$$E - E' = C \mid A + A \mid F + F \mid C$$

ou, par le symbole abrégé,

$$E'' = C \mid A \mid F \mid C.$$

4° La différence de potentiel entre deux métaux quelconques C

et Z plongés dans un même électrolyte A doit être égale à

$$J(\theta_Z \varepsilon_Z - \theta_C \varepsilon_C) - E_{ZC}$$

θ_Z et ε_Z étant les valeurs applicables à la réaction qui se produit entre le métal Z et l'électrolyte A dans un élément où Z est le métal négatif, θ_C et ε_C étant les valeurs applicables à la réaction entre le même électrolyte et le métal C dans un autre élement où C est le métal négatif. En effet, supposons que l'on associe tour à tour chacun de ces métaux à un troisième métal P choisi de telle sorte qu'il constitue, dans les deux éléments ainsi formés, le métal positif qui n'est pas attaqué. Le changement produit dans la force électromotrice de l'élément complet, quand on substitue C à Z, est simplement le changement produit dans l'action chimique, c'est-à-dire $J(\theta_Z\varepsilon_Z - \theta_C\varepsilon_C)$ et par suite ce changement dans la force électromotrice de l'élément incomplet doit être égal à l'expression donnée plus haut; mais ce changement dans la force électromotrice, dû à la substitution d'un métal à l'autre, doit représenter, d'après le second corollaire, la force électromotrice de l'un des métaux par rapport à l'autre, quand ils sont tous deux dans une même dissolution. Il suit de là que, si aucune action chimique n'a lieu, on a

$$\theta_Z\varepsilon_Z = \theta_C\varepsilon_C = 0,$$

et par conséquent, d'après le corollaire 3,

$$E_{ZA} + E_{AC} + E_{CZ} = 0;$$

en d'autres termes, si l'électrolyte n'attaque aucun des deux métaux, il agit comme un conducteur solide.

5° Avec des électrolytes différents, le rang d'un métal change dans les séries, car la quantité $\theta\varepsilon$, correspondant à un même couple de métaux, n'a pas les mêmes valeurs dans des réactions différentes.

6° Le degré de concentration de la dissolution employée dans un élément ne peut affecter la force électromotrice qu'autant qu'il modifie la valeur de $\theta\varepsilon$ pour la même réaction. Comme un changement dans la concentration de la dissolution modifie quelque peu la valeur de la force électromotrice, il semble que le travail nécessaire

pour produire une réaction donnée varie avec le degré de la concentration.

7° Aucun changement dans la force électromotrice d'un élément ne peut se produire quand on substitue, pour former le pôle positif, une substance inerte à une autre, si toutefois de telles substances existent.

Appelons E_{XM} la force électromotrice développée au contact de la substance inerte X et du métal actif M, et E_{AX} la force électromotrice produite au contact de l'électrolyte et de la substance inerte; la somme $E_{AX} + E_{XM}$ doit être constante avec tous les métaux pour la même substance X. Si cette somme varie d'un métal actif à un autre, c'est que la substance en apparence inerte est réellement le siège d'une action chimique.

8° La présence d'une substance inerte dans l'électrolyte ne peut changer la force électromotrice de la chaîne, mais elle pourrait changer la distribution des potentiels.

9° Toute polarisation est nécessairement accompagnée d'un changement dans l'action chimique. Dans la théorie du contact, il est aisé de voir comment la polarisation change la force électromotrice; ainsi on dit habituellement que dans l'élément ordinaire cuivre-zinc le cuivre se recouvre d'une couche d'hydrogène. La présence de l'hydrogène change la série de surfaces en contact, et d'après le corollaire 4 la différence de force électromotrice entre un élément à électrode d'hydrogène et un élément à électrode de cuivre est égale à $J(\theta'\varepsilon' - \theta''\varepsilon'') - E_{HC}$; $\theta'\varepsilon'$ et $\theta''\varepsilon''$ sont les quantités de chaleur qui correspondent à la combinaison d'un équivalent électrochimique d'hydrogène et de cuivre respectivement avec certains éléments de l'électrolyte, et E_{HC} est la force électromotrice due au contact du cuivre et de l'hydrogène; mais, pour que cette différence ne puisse être nulle, la somme de $J\theta\varepsilon$ doit être changée dans l'ensemble des réactions de l'élément. Puisque la polarisation change la force électromotrice d'un élément de pile, on doit en conclure que le dégagement d'hydrogène libre contre une couche d'hydrogène naissant adhérente à un métal exige une quantité de travail différente de celle qui est nécessaire pour effectuer le dépôt d'hydrogène naissant sur le métal. Tant que la polarisation se continue, une des actions chimiques qui se produisent dans l'élément est la

formation d'un dépôt condensé d'hydrogène sur la plaque de métal; dès que cette formation s'arrête, la force électromotrice demeure constante. L'action qui s'exerce entre l'hydrogène et le métal nu, c'est-à-dire non recouvert d'hydrogène, aide au développement du courant, et l'intensité de cette action tombe à zéro lorsque le métal est saturé. Quand le courant cesse, l'affinité de cet hydrogène condensé pour l'oxygène de l'eau surpasse l'affinité de l'hydrogène pour le métal et un courant de sens inverse se produit. Ce courant devient de plus en plus faible à mesure que l'hydrogène abandonne le métal; car l'affinité, s'il est permis d'employer ce mot, de l'hydrogène pour le métal s'accroît à mesure que le métal devient de moins en moins saturé. L'équivalence entre l'intensité du courant développé par la polarisation et le travail dépensé par un courant pour produire la polarisation est évidente dans cette manière d'expliquer les faits.

10° La force électromotrice développée par le contact de deux métaux subit des changements très considérables quand une modification survient dans l'état moléculaire de ces métaux, dans leur trempe ou leur structure cristalline; toutefois ces changements n'amènent que de très faibles variations dans la force électromotrice du circuit, parce qu'ils sont à peu près entièrement compensés par le changement qui se produit dans les différences de potentiel aux surfaces de séparation de l'électrolyte et des métaux. La compensation serait absolue si les réactions chimiques qui s'accomplissent dans l'élément exigeaient toujours la même quantité de travail; mais, quand l'état moléculaire des métaux varie, ce travail n'est pas tout à fait constant.

6. Les valeurs absolues des forces électromotrices produites par les éléments à un seul liquide non polarisés ne sont pas exactement connues, et, à cause de la polarisation qui s'opère toujours sous l'influence d'un courant quelconque, elles ne peuvent être déterminées par des observations galvanométriques; mais cela importe peu, car la valeur de cette force électromotrice, qui n'est pas constante, ne pourrait être utilisée dans l'application d'aucune des formules dépendant de la loi d'Ohm. La force électromotrice effective d'un élément de Smée est environ $0^{\text{volt}},47$.

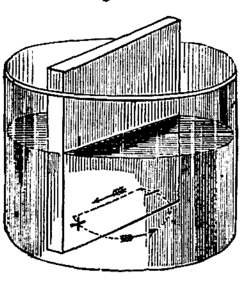
La nature de la dissolution employée modifie peu la valeur de la

force électromotrice, mais elle exerce une influence considérable sur la résistance. L'eau pure présente une résistance beaucoup plus grande qu'une quelconque des dissolutions employées dans les piles; par conséquent un élément formé d'eau pure ou à peu près pure ne donnera qu'un courant de très faible intensité, même à travers un circuit extérieur de petite résistance. Si l'on y ajoute du sel ordinaire, de l'acide sulfurique ou de l'acide azotique, l'intensité du courant augmente aussitôt. Ce fait est dû simplement au changement apporté dans la résistance totale du circuit et non à une augmentation de la force électromotrice. Une dissolution d'acide sulfurique et d'eau contenant 30 pour 100 d'acide sulfurique a une résistance moindre que toute autre dissolution contenant une quantité plus grande ou plus petite d'acide sulfurique; mais, quand on l'emploie pour charger une pile, elle donne lieu à une oxydation du zinc sans aucun effet utile, puisque cette oxydation ne produit aucun courant à l'extérieur de l'élément. Aussi emploie-t-on en général des dissolutions beaucoup plus faibles, contenant environ une partie d'acide sur douze. On se sert encore, pour charger les piles, d'une dissolution de sel ordinaire ou de sulfate de zinc, la première dissolution parce qu'elle ne présente qu'une faible résistance, la seconde parce qu'elle n'est pas modifiée dans sa composition par l'action chimique dont les éléments de pile sont le siège.

7. Il se produit presque toujours à quelque degré une oxydation inutile du zinc ou de toute autre électrode attaquée dans l'élément; cet effet est le résultat d'une action particulière qu'on appelle *action locale*. L'action locale provient de l'hétérogénéité du zinc exposé à l'action du liquide. Cette hétérogénéité rend certains points de la plaque électronégatifs par rapport à d'autres points. Ces points, en communication métallique à travers la masse du zinc, constituent avec le liquide un élément de pile dont la force électromotrice est faible, mais dont la résistance est extrêmement petite; et un courant se produit dans un circuit local, suivant le sens indiqué par des flèches dans la *fig.* 115. La partie du zinc qui est la plus électropositive est consumée; le courant ainsi développé se confine dans l'élément et ne peut pas être utilisé. On augmente beaucoup cette action locale en diminuant la résistance

du liquide; on la diminue au contraire notablement en amalgamant la surface du zinc. Cette opération consiste à décaper la surface des plaques de zinc avec de l'acide sulfurique ou de l'acide chlorhydrique étendu, et à frotter ensuite avec une brosse cette sur-

Fig. 115.



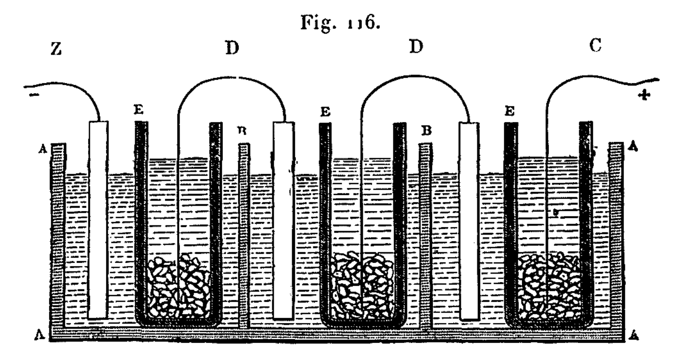
face recouverte d'un peu de mercure. La couche superficielle est ainsi formée d'une matière uniforme qui ne présente plus ces différences de trempe désignées par les mots de métal « recuit » et « non recuit »; et, par suite, elle n'est attaquée par la dissolution que si le circuit extérieur est fermé : le zinc n'est plus consumé que pour produire des courants utiles. Dans plusieurs modèles de pile la plaque de zinc est maintenue d'une façon permanente en contact avec une petite quantité de mercure.

8. Les piles à un seul liquide sont encore sujettes à un inconvénient autre que celui qui résulte de la polarisation; la dissolution ordinairement employée ne peut être maintenue commodément dans un état de composition constante. Par exemple, l'acide sulfurique, dont on se sert dans la plupart des piles de ce genre, disparaît peu à peu en même temps que le zinc avec lequel il se combine; la résistance de la pile va donc sans cesse en croissant, et de temps en temps il est nécessaire de *rafraîchir,* comme on dit, l'élément en y ajoutant de l'acide sulfurique. Concluons que les piles à un seul liquide présentent trois inconvénients : leur force électromotrice est affaiblie par la polarisation; elle n'est pas constante; enfin leur résistance est aussi variable.

9. On a remédié à tous ces défauts au moyen des piles à deux li-

quides, dont la première en date est la *pile Daniell* (*fig.* 116) : c'est celle que nous choisirons comme type des piles à deux liquides. Dans le modèle de la pile Daniell qui présente le plus de constance, le zinc est plongé dans une dissolution à demi saturée de sulfate de zinc

Fig. 116.

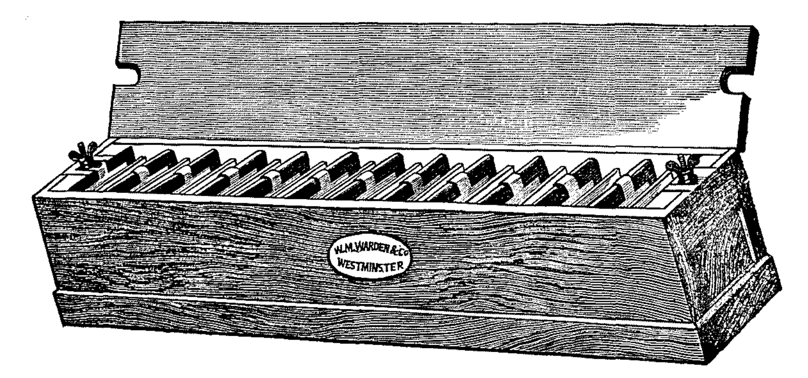


et le cuivre dans une dissolution saturée de sulfate de cuivre; pour séparer ces deux dissolutions, on peut employer une cloison poreuse en terre de porcelaine dégourdie, ou mettre à profit la différence de leurs poids spécifiques.

La *fig.* 116 représente 3 éléments Daniell pourvus de vases poreux; c'est le modèle adopté dans la télégraphie. La caisse en verre AA est divisée, par des cloisons également en verre B,B, en compartiments ou éléments distincts qui se trouvent isolés les uns des autres. Dans ces compartiments sont les vases poreux en porcelaine E,E,E, qui contiennent une dissolution saturée de sulfate de cuivre et sont baignés extérieurement par une dissolution à demi saturée de sulfate de zinc. Chaque plaque de zinc est réunie par une tige de communication D à une plaque de cuivre; les plaques de cuivre, qui sont minces, sont placées dans les vases poreux, et celles de zinc, qui sont épaisses, dans la dissolution de sulfate de zinc. La dernière plaque de cuivre C forme le pôle positif de la pile; à la première plaque de zinc Z est soudé un fil de cuivre qui forme le pôle négatif. Dans un modèle fréquemment employé et désigné sous le nom de *pile de Muirheads,* que la *fig.* 117 représente, l'auge en verre AA contient 10 éléments et est renfermée dans une caisse en bois de teck, pourvue d'un couvercle,

aux deux extrémités duquel passent des fils garnis de gutta-percha qui s'attachent aux pôles de la pile. On met dans les vases poreux des cristaux de sulfate de cuivre de la grosseur d'une noisette, pour maintenir la dissolution à l'état de saturation. Chacune des tiges de communication en cuivre est fixée par des rivets au zinc suivant, qu'on a soin d'étamer pour assurer le contact. Les plaques de zinc peuvent avoir $0^m,10$ de longueur sur $0^m,05$ de largeur; les plaques de cuivre sont d'environ 25^{cq}. Le zinc doit être maintenu à la partie supérieure de l'élément et ne point descendre jusqu'au fond du vase.

Fig. 117.



10. La série des actions chimiques qui se produisent dans l'élément Daniell, lorsque le fonctionnement est parfait, a déjà été décrite au Chapitre XI (n° 9). L'acide sulfurique et l'oxygène du sulfate de zinc se portent sur le zinc de la plaque et se combinent avec lui pour former de nouvelles quantités de sulfate de zinc; d'autre part, l'acide sulfurique et l'oxygène du sulfate de cuivre sont entraînés vers le zinc de la solution, mis en liberté par la réaction précédente, et reforment ainsi du sulfate de zinc; le cuivre précipité du sulfate se dépose sur l'électrode de cuivre et y demeure adhérent. En somme, l'opération consiste dans la substitution d'une certaine quantité de sulfate de zinc à une quantité équivalente de sulfate de cuivre et dans le dépôt d'une certaine quantité de cuivre sur l'électrode cuivre ou négative. L'acide sulfurique et l'oxygène ont une affinité plus grande pour le zinc que pour le cuivre; s'il

en était autrement, il n'y aurait pas d'énergie créée par le fait de cette substitution. Sous deux points de vue essentiels, la pile de Daniell se différencie avantageusement d'une pile à un seul liquide.

1° Aucune trace d'hydrogène libre n'apparaît sur l'électrode cuivre. Il est impossible de dire si l'eau est ou n'est pas décomposée dans une phase quelconque de ces réactions; mais, s'il y a décomposition, l'oxygène et l'hydrogène se recombinent sans apparaître libres. Dans la pile à un seul liquide, qu'on a décrite, l'oxygène de l'eau décomposée se combine avec le zinc ou tout autre métal électropositif, laissant en liberté une quantité équivalente d'hydrogène. Dans l'élément Daniell, il n'y a plus d'oxygène emprunté à l'eau : c'est le sulfate de cuivre qui fournit l'oxygène nécessaire, et par suite aucune molécule d'hydrogène n'apparaît à l'état de liberté.

2° Il est relativement facile de maintenir les deux dissolutions dans un état de composition constante; il suffit de placer dans la dissolution de sulfate de cuivre quelques cristaux de ce sel; la dissolution de sulfate de zinc, si elle est saturée au commencement, dépose simplement à l'intérieur du vase le sulfate de zinc qui se forme pendant que la pile est en activité. Dans la pratique, on trouve préférable d'employer une dissolution à moitié saturée de sulfate de zinc; quand cette dissolution est entièrement saturée, il se forme une efflorescence de cristaux de sulfate de zinc qui s'élève sur les bords de la dissolution; cette efflorescence entrave l'action de la pile si elle vient à se répandre sur le zinc, et nuit à son isolement en formant une pellicule conductrice tout autour des bords du vase et sur les tiges de communication en cuivre.

11. L'élément Daniell fournit une force électromotrice constante et conserve à peu près la même résistance pendant plusieurs semaines consécutives. Pour qu'il en soit ainsi, il faut prendre les précautions suivantes :

On doit examiner chaque jour les dissolutions et les maintenir dans un état convenable en ajoutant des cristaux de sulfate de cuivre dans l'une et en retirant les cristaux de sulfate de zinc qui se sont déposés dans l'autre; on achève de remplir les vases avec de l'eau. Il ne faut laisser s'amasser sur les bords des vases ni sulfate de zinc ni aucun corps étranger. La plaque de zinc ne doit pas

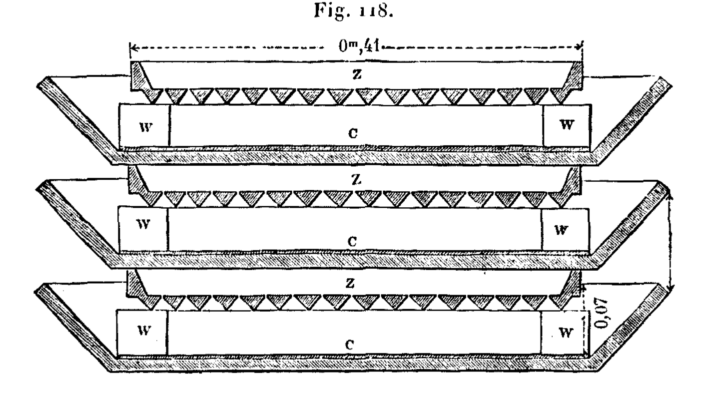
toucher le vase poreux; autrement du cuivre se déposerait sur elle et donnerait lieu à une action locale. Le sulfate de cuivre ne doit pas contenir de fer. Pour reconnaître la présence du fer, on ajoute de l'ammoniaque liquide à la dissolution de ce sulfate; le cuivre et le fer sont d'abord précipités tous deux en formant un amas floconneux; mais, si l'on continue de verser de l'ammoniaque, le cuivre se redissout en donnant naissance à une liqueur d'un beau bleu, et le fer demeure au fond du vase sous la forme d'une poudre brune. Il faut éviter de se servir d'un acide pour mettre en activité une pile nouvellement montée, à moins qu'on n'ait en vue d'obtenir une pile de faible résistance et non une pile dont le courant soit constant : on charge la pile nouvelle avec le sulfate de zinc retiré de l'ancienne pile. La surface des plaques de cuivre et de zinc doit être nette; dans le cas contraire, on les nettoie en les chauffant au rouge et en les plongeant dans une dissolution d'ammoniaque étendue. Les gratte-boesses dont on se sert dans les manufactures de coton sont d'excellentes brosses pour les piles. On doit examiner les vases poreux pour s'assurer qu'ils ne sont pas fêlés; si on les met de côté momentanément après s'en être servi, il faut les tenir humides; sinon la cristallisation du sulfate de zinc qu'ils contiennent les briserait. On doit veiller à ce que la dissolution de sulfate de cuivre ne s'élève pas dans le vase poreux au point d'en dépasser les bords, sous l'action de l'*endosmose;* c'est le nom qu'on donne à la force en vertu de laquelle un liquide passe d'un côté à l'autre d'une cloison poreuse. La résistance de l'élément qu'on vient de décrire peut descendre jusqu'à 4 ohms avec les vases très poreux de Wedgwood; le plus souvent cette résistance varie entre 6 ohms ou 10 ohms.

12. La pile de Daniell a reçu des formes très variées dans sa construction. Pour des éléments de grande dimension, on se sert d'un flacon en verre ou d'une jarre en terre cuite. Les vases poreux sont de forme cylindrique; les plaques de cuivre et de zinc sont repliées sur elles-mêmes et forment des portions de cylindre. A l'intérieur des vases poreux on peut placer ou les plaques cuivre ou les plaques zinc; mais ces dernières doivent toujours se trouver dans le compartiment de plus grand volume. Quelquefois l'électrode cuivre est constituée par la jarre même qui contient le sulfate de

cuivre, le zinc étant alors à l'intérieur du vase poreux. Ce modèle d'élément Daniell ne peut être recommandé : le vase de cuivre est fréquemment rongé aux angles et laisse la liqueur s'écouler au dehors.

Une modification plus importante dans l'élément Daniell consiste à remplacer le vase poreux par de la sciure de bois. La plaque de cuivre est posée au fond du vase et recouverte de cristaux de sulfate de cuivre ; sur ces cristaux on place une couche de sciure de bois qui se trouve mouillée par la solution de sulfate de cuivre à la partie inférieure de l'élément et par la solution de sulfate de zinc à la partie supérieure ; enfin sur la surface supérieure repose la plaque de zinc. Cette forme de pile fut d'abord employée par Sir William Thomson qui donnait à la plaque de cuivre la forme d'un bassin reposant directement sur le zinc de l'élément inférieur : elle serait très commode pour des plaques de grande dimension si le cuivre n'était pas fréquemment rongé et troué. Pour remédier à ce défaut, Thomson emploie des cuves de bois, doublées d'une feuille de plomb, et dont le fond est recouvert de cuivre par la galvanoplastie. La *fig.* 118

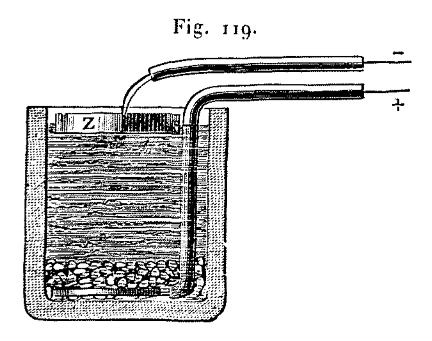
Fig. 118.



représente trois de ces cuves de forme carrée : les zincs ont $0^m,41$ de longueur sur $0^m,41$ de largeur, la profondeur des cuves est de $0^m,07$. Le zinc est façonné en forme de grille pour permettre aux bulles de gaz de s'échapper ; il est supporté par des règles en bois disposées aux quatre coins des bassins. La résistance d'un de ces éléments est d'environ $0^{ohm},2$.

13. La *fig.* 119 représente un élément de pile connu sous le nom d'*élément Minotto* (¹); ce n'est qu'une légère modification de la

Fig. 119.



pile à sciure de bois. Au fond d'un vase en porcelaine ou en verre on dépose un disque de cuivre C, auquel on a soudé un bout de fil de cuivre recouvert de gutta-percha. Ce fil sort du vase et forme le pôle positif. La plaque de cuivre est recouverte de cristaux de sulfate de cuivre et de sciure de bois, comme on l'a dit plus haut, et la plaque de zinc repose sur la surface du liquide. On verse quelquefois sur le liquide une couche d'huile pour empêcher l'évaporation. En général, ces éléments ont environ $0^m,10$ de diamètre intérieur et $0^m,12$ de hauteur. Les plaques de métal ont alors un diamètre d'environ $0^m,0825$. Ce modèle de pile est aisé à transporter; il a une force électromotrice constante, mais sa résistance est considérable, et s'élève en général à 20 ohms dans un élément monté avec soin. Il est principalement employé dans les essais électriques. Les piles à sciure de bois sont très propres aux expériences faites à bord des vaisseaux; à la mer, l'agitation du liquide dans les éléments de pile tend à altérer la force électromotrice et à produire une polarisation variable; car, en réalité, il y a toujours un peu de polarisation, même dans l'élément Daniell.

Les piles dites *de gravité* ressemblent à l'élément Minotto d'où l'on a retiré la sciure de bois. Il faut les maintenir dans un repos absolu, et l'on constate qu'elles sont d'un entretien difficile.

(¹) Cet élément ne diffère, sous aucun rapport, de celui imaginé en 1858 par Sir William Thomson pour les essais du câble atlantique.

14. Passons en revue les autres piles à deux liquides dont on se sert dans la pratique.

1° *Élément Marié-Davy.* — Il consiste en une électrode de charbon qu'entoure une pâte de protosulfate de mercure (Hg^2O, SO^3) contenue dans un vase poreux, et en une électrode de zinc qui baigne dans une dissolution d'acide sulfurique étendu ou de sulfate de zinc. L'action chimique est semblable à celle qui se produit dans l'élément Daniell; il se forme du sulfate de zinc, et du mercure est déposé sur l'électrode de charbon.

Le sulfate de mercure tend à s'élever par un effet de capillarité à la jonction du charbon et du cuivre; il attaque alors le cuivre et peut détruire la continuité du circuit. Pour remédier à cet inconvénient, on plonge la partie supérieure du charbon dans un bain de paraffine fondue qui en remplit les pores. Le sulfate de mercure est cher, mais la quantité de mercure nécessairement perdue est très faible.

Le mercure déposé peut être facilement converti de nouveau en protosulfate; ce sel est un poison. La force électromotrice de l'élément Marié-Davy est d'environ $1^{volt},5$, mais sa résistance est plus grande que celle de l'élément Daniell.

2° *Élément Grove.* — Cet élément, bien connu et très fréquemment employé, consiste en une électrode de platine plongée dans de l'acide azotique plus ou moins étendu et en une électrode de zinc plongée dans une dissolution d'acide sulfurique qui renferme à peu près 1 partie d'acide sur 12 parties d'eau; les deux liquides sont séparés par un vase poreux. Le zinc est converti en sulfate de zinc; c'est l'eau qui fournit la quantité d'oxygène nécessaire à cette transformation. L'hydrogène ne demeure pas à l'état libre sur l'électrode de platine: il réduit l'acide azotique et donne de l'eau et du gaz acide hypoazotique. Ce gaz se dissout en partie, et le reste s'échappe sous forme de vapeurs nitreuses; ces vapeurs ne sont pas seulement désagréables, elles sont délétères. La force électromotrice de cet élément s'élève jusqu'à 2 volts lorsque l'acide azotique est concentré et que le mélange d'eau et d'acide sulfurique a une densité spécifique de 1,136, correspondant à 20 parties en poids d'acide sulfurique sur 100 parties du mélange; elle descend à $1^{volt},63$ lorsque le mélange d'eau et d'acide azotique

a une densité spécifique de 1,19, correspondant à 26,3 parties en poids d'acide azotique sur 100 parties du mélange, et que le mélange d'eau et d'acide sulfurique a une densité spécifique de 1,06, correspondant à 9 parties en poids d'acide sulfurique sur 100 parties du mélange.

Quand l'électrode de zinc est dans une dissolution de sulfate de zinc et que le mélange d'acide azotique et d'eau a pour densité 1,33 (45 parties d'eau sur 100), la force électromotrice est $1^{volt},67$.

Quand l'électrode de zinc est dans une dissolution de sel ordinaire et que le mélange d'acide azotique et d'eau a pour densité 1,33, la force électromotrice est $1^{volt},9$.

La force électromotrice de cet élément est très élevée, mais son grand mérite est sa faible résistance qui, avec des éléments de dimension moyenne, peut être réduite à $\frac{1}{4}$ d'ohm. On a trouvé $0^{ohm},212$ pour la résistance d'un élément Grove dans les conditions suivantes :

Surface de la plaque de zinc, $176^{cq},08$.

Surface de la plaque de platine, $89^{cq},01$.

Poids spécifique de l'acide sulfurique, 1,06.

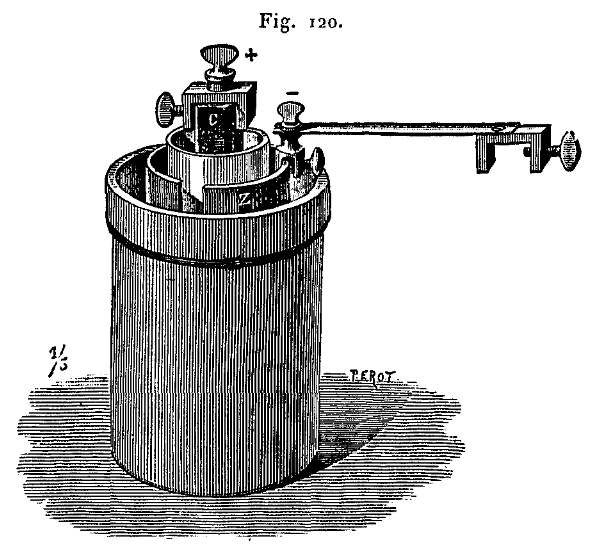
Mélange d'acide azotique et d'eau contenant 26,3 parties d'acide en poids pour 100 parties du mélange.

On peut aisément doubler la force électromotrice d'une pile Daniell en doublant le nombre de ses éléments; mais il faudrait augmenter énormément la dimension de ces derniers pour réduire la résistance d'un élément Daniell à celle d'un élément Grove de petite dimension.

3° *Élément Bunsen.* — Cet élément est exactement semblable à celui de Grove ; le platine est seulement remplacé par un charbon poreux (*fig.* 120). Dans les éléments Bunsen et Grove, le zinc doit toujours être amalgamé; sinon il se produit une action locale qui détermine des vapeurs insupportables et une grande perte de zinc. La force électromotrice de l'élément Bunsen est un peu plus grande que celle de l'élément Grove, mais sa résistance est plus considérable aussi. On éprouve quelquefois de la difficulté à assurer un bon contact entre l'électrode en charbon et la tige métallique ou le fil dont on se sert pour relier cette électrode au zinc suivant ou à la borne extrême de la pile. Les charbons sont préparés d'une

manière spéciale pour toutes les piles à charbon; ils diffèrent beaucoup en qualité. La partie supérieure du charbon doit être imprégnée de stéarine pour empêcher la corrosion du contact métallique.

Fig. 120.



Faure met l'acide azotique dans l'intérieur de l'électrode en charbon, à laquelle il donne la forme d'une bouteille fermée par un bouchon de charbon. Le charbon remplit le double office de vase poreux et d'électrode. Les vapeurs nitreuses s'élèvent dans l'intérieur de la bouteille et exercent une pression qui facilite la pénétration de l'acide azotique à travers les pores du charbon.

La résistance d'un élément Bunsen ordinaire de $0^m,12$ de hauteur, le charbon étant à l'extérieur du zinc, varie entre 2 et 3 ohms, d'après M. Blavier, au moment où il vient d'être chargé; mais cette résistance double au bout de quelques heures.

4° *Élément au bichromate de potasse.* — Cet élément est décrit par Latimer Clark de la manière suivante : « Faites dissoudre 62^{gr} de bichromate de potasse dans 620^{gr} d'eau chaude, et, quand cette dissolution sera refroidie, ajoutez-y 310^{gr} d'acide sulfurique. Comme cette addition détermine un échauffement notable de la dissolu-

tion, il faut la laisser refroidir avant de l'employer. Préparez en second lieu une dissolution saturée de sel ordinaire ou chlorure de sodium. Pour former une pile avec ces dissolutions, on verse dans le vase poreux contenant le charbon une quantité de dissolution de bichromate suffisante pour amener son niveau à peu près à 12^{mm} du bord supérieur du vase, puis on remplit le vase extérieur avec la dissolution salée jusqu'à ce qu'elle y atteigne le même niveau. »

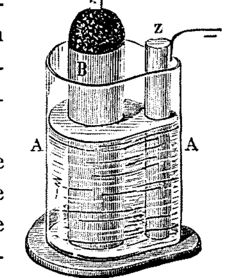
On regarde la force électromotrice de cet élément comme égale à 2 volts.

Le chlore du sel ordinaire s'unit au zinc pour former du chlorure de zinc, tandis qu'à l'électrode de charbon le sodium se substitue à l'hydrogène de l'acide sulfurique pour former du sulfate de soude. L'hydrogène naissant réduit l'acide chromique (qui s'est formé par l'action de l'acide sulfurique sur le bichromate de potasse), et il se produit du sulfate de sesquioxyde de chrome. La réaction est exprimée par la formule chimique

$$3\,Zn + 3\,NaCl + 6\,SO^3,HO + 2\,CrO^3$$
$$= 3\,ZnCl + 3\,NaO,SO^3 + Cr^2O^3,3\,SO^3 + 6\,HO.$$

5° *Élément Leclanché*. — Cet élément est formé de zinc et de charbon (*fig.* 119). Le zinc est plongé dans une dissolution de sel ammoniac ordinaire du commerce, et la lame de charbon est placée dans un vase poreux; on remplit complètement ce dernier d'un mélange de bioxyde de manganèse et de charbon grossièrement concassé, qne l'on tasse fortement autour de la lame. La force électromotrice de cet élément est d'environ $1^{volt},48$.

Fig. 121.



Le zinc s'unit avec le chlore du chlorhydrate d'ammoniaque pour former du chlorure de zinc, et le gaz ammoniac mis en liberté se porte à l'électrode négative, tandis que l'hydrogène naissant provenant de l'ammonium réduit le peroxyde de manganèse à l'état de sesquioxyde. C'est ce qu'indique la formule suivante :

$$Zn + 2\,MnO^2 + AzH^3,HCl = ZnCl + Mn^2O^3 + AzH^3 + HO$$

6° *Élément Latimer Clark.* — Cet élément de force électromotrice constante a déjà été décrit au Chapitre X (n° 2).

15. Quel que soit le modèle employé, il est de la plus haute importance que, pendant toutes les expériences délicates, la pile soit, dans son ensemble, parfaitement isolée, et que chaque élément soit parfaitement isolé de son voisin. Pour les piles qui servent aux transmissions télégraphiques, ces conditions sont moins essentielles; mais elles sont toujours désirables. Lorsqu'une pile ne fournit plus de courant ou donne un courant d'intensité beaucoup plus faible que le courant normal, les défauts suivants doivent être recherchés :

1° Les dissolutions sont épuisées; par exemple, le sulfate de cuivre dans l'élément Daniell est entièrement ou presque entièrement réduit, et la liqueur est devenue incolore.

2° Les bornes ou les communications entre les éléments sont corrodées; de sorte que le circuit est fermé non plus par des métaux, mais par des oxydes dont la résistance est presque égale à celle des corps isolants.

3° Il y a des éléments vides ou à peu près vides.

4° Des filaments métalliques provenant des dépôts de métal s'étendent d'une électrode à l'autre.

Des courants intermittents sont quelquefois produits par des fils mal assujettis ou par une électrode rompue, qui, sous la moindre secousse, établissent ou suppriment des contacts. On observe encore des courants irréguliers lorsque l'on secoue les éléments d'une pile, à moins qu'ils ne soient établis dans d'excellentes conditions : le mouvement imprimé aux vases débarrasse les électrodes des gaz qui s'y trouvaient accumulés et augmente momentanément la force électromotrice.

CHAPITRE XVI.

MESURE DES RÉSISTANCES.

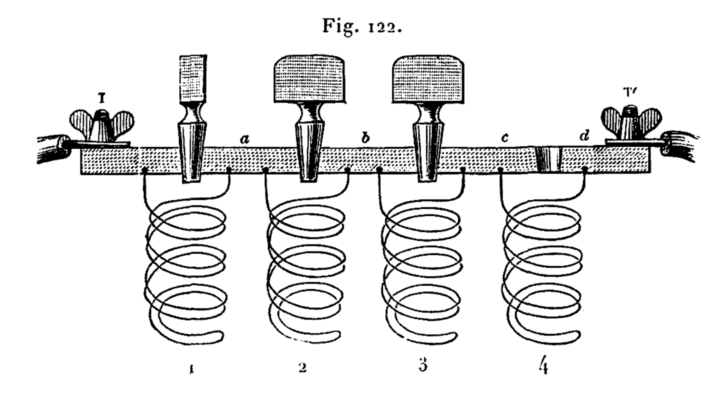
1. Pour mesurer une résistance, il faut la comparer à une résistance étalon prise comme *unité*. En Télégraphie, la mesure des résistances joue un rôle très important; car elle guide dans le choix des substances à employer et permet à l'électricien de vérifier la qualité des matières qui lui sont fournies. L'*ohm* (Chap. X, n° 4) est l'unité de résistance à peu près universellement adoptée. On dispose dans des caisses ou boîtes dites *de résistances* des bobines équivalentes à des multiples ou sous-multiples déterminés de l'ohm, de telle manière qu'il soit possible d'obtenir rapidement une résistance donnée, comprise entre 1 ohm et 10000 ou 100000 ohms. La *fig.* 122 indique la disposition générale de ces caisses de résistances.

Entre deux bornes à écrou T et T′, fixées sur une tablette d'ébonite, sont montés une série de blocs en laiton a, b, c, d; chacun d'eux est relié au bloc voisin par une bobine de résistance, ainsi qu'on le voit en 1, 2, 3 et 4. Un certain nombre de chevilles coniques, à tête isolante en ébonite, peuvent être insérées entre deux blocs consécutifs quelconques, par exemple entre T et a ou entre a, b, ...; des ouvertures de forme conique sont pratiquées à cet effet dans les intervalles ménagés entre les blocs. Quand les chevilles sont enlevées, il n'existe entre deux blocs consécutifs aucune autre communication électrique que celle établie par la bobine interposée.

Supposons que la résistance de la première bobine soit 1 ohm, celle de la deuxième 2 ohms, celle de la troisième 3 ohms et enfin

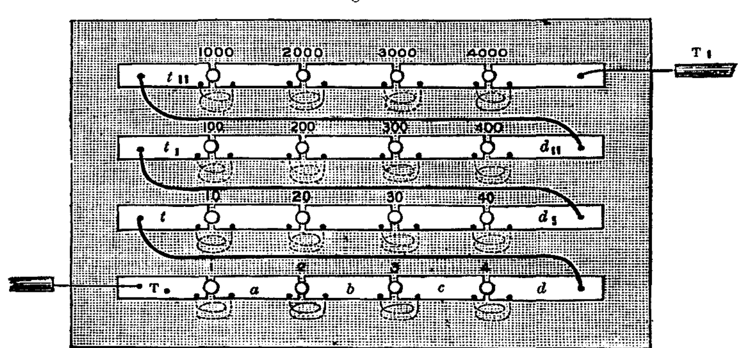
celle de la quatrième 4 ohms. Si les chevilles sont disposées comme dans la *fig.* 122, la résistance totale entre T et T′ est 4 ohms; car

Fig. 122.



la résistance de ces larges blocs métalliques reliés directement par des chevilles est négligeable entre T et *c*. Si toutes les chevilles étaient retirées, la résistance entre T et *d* serait 10 ohms; en disposant convenablement les chevilles, on peut évidemment former

Fig. 123.



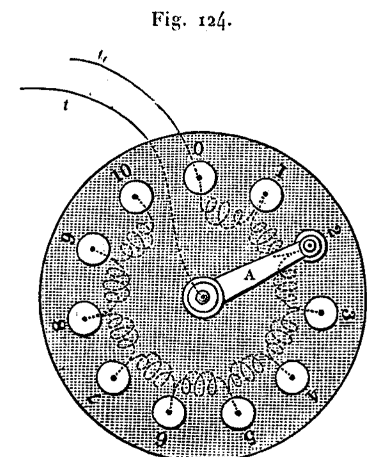
une résistance quelconque de 1 à 10 ohms entre T et *d*. Supposons maintenant que *d*, au lieu d'être la borne extrême de la caisse de résistances, soit relié à *t* par une tige épaisse de cuivre, comme le montre la *fig.* 123, qui représente en plan le couvercle de la caisse, et imaginons une autre série de blocs servant à relier des bobines de

10, 20, 30 et 40 ohms de la même manière que les blocs *a*, *b*, *c* et *d* relient les bobines de 1, 2, 3 et 4 ohms. Si toutes les chevilles sont hors des trous entre *t* et d_1, la résistance intercalée entre ces deux points est de 100 unités; mais, en introduisant des chevilles aux ouvertures convenables, on peut former à volonté des résistances de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 ou 90 unités. Veut-on, par exemple, obtenir une résistance de 80 unités; on retirera les première, troisième et quatrième chevilles, ce qui donnera 10 + 30 + 40 ou 80 unités. Entre T et d_1, on peut évidemment, en bouchant les ouvertures convenables, obtenir une résistance d'un nombre quelconque d'unités compris entre 1 et 110. Le bloc d_1 est rattaché par une tige épaisse au bloc t_1 qui est le premier d'une nouvelle série de cinq blocs reliant des bobines de 100, 200, 300 et 400 unités. Au moyen de ces bobines, nous pourrons former entre T et d_{11}, avec nos douze chevilles, une résistance d'un nombre quelconque d'unités compris entre 1 et 1110. Avec une nouvelle série de cinq blocs et quatre nouvelles bobines, nous aurons entre T et T_1, bornes extrêmes de la caisse, seize bobines et seize ouvertures et, en plaçant convenablement les chevilles, nous pourrons former une résistance d'un nombre quelconque d'unités compris entre 1 et 11 110. Quand toutes les chevilles sont en place, la résistance entre T et T_1 ne doit être qu'une fraction très petite d'un ohm. Si l'on observe une résistance de valeur appréciable, il faut nettoyer soigneusement les chevilles et les trous; car la résistance qu'on aura constatée dans ces conditions ne peut provenir que d'un contact métallique imparfait entre les trous et les chevilles.

2. On peut adopter un grand nombre d'autres dispositions pour former une caisse de résistances. Ainsi on aurait pu placer sur chaque ligne de blocs, au lieu des quatre bobines qui s'y trouvent, dix bobines égales entre elles; mais ce système aurait nécessité quarante chevilles au lieu de seize. On aurait pu encore disposer dix bobines en cercle et les mettre en communication avec onze blocs équidistants rangés eux-mêmes en cercle (*fig.* 124). La résistance entre t_1 et *t* serait de 2 ohms si le levier A était sur le deuxième bloc, ou de 5 ohms s'il était sur le cinquième bloc. On peut aussi donner à l'extrémité du levier A une forme telle, qu'avant

d'abandonner un bloc, il se trouve déjà en contact avec le bloc suivant; de cette façon le circuit n'est jamais entièrement rompu entre t et t_1.

Fig. 124.

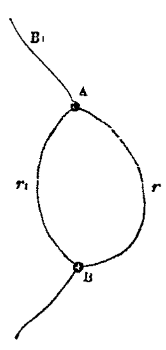


Dans la construction des caisses de résistances il y a lieu d'observer les règles suivantes. On doit employer un fil de gros diamètre, au lieu d'une petite longueur de fil fin, pour former les bobines de moindre résistance. La bobine est ainsi plus facile à ajuster et moins susceptible de dérangement sous l'action d'un courant énergique. Il faut choisir pour le fil un métal dont la résistance varie peu avec les changements de température; à ce point de vue l'argent allemand convient parfaitement. Les fils des bobines doivent être isolés par deux enveloppes de soie qu'on recouvre de paraffine solide ou de toute autre matière isolante appropriée à cet usage. Les soudures sont interdites dans l'intérieur des bobines, et surtout les soudures faites au moyen d'un acide. On doit enrouler le fil en double, de manière que le courant fasse autant de tours de gauche à droite que de droite à gauche. Dans une bobine ainsi formée, le courant n'exerce aucune induction sur lui-même (Chap. III, n° 21) et ne produit aucun effet sur un galvanomètre placé dans le voisinage. Les blocs de communication doivent être solidement établis, bien isolés et de forme telle que la tablette en ébonite sur laquelle ils sont

assujettis puisse se nettoyer aisément. Il est avantageux d'enrouler les bobines sur des cylindres creux et de diamètre plutôt grand que petit, afin d'obtenir autant que possible l'uniformité de la température. Toutes les bobines doivent être enfermées dans une même boîte.

3. Soient A et B deux points (*fig.* 125) reliés par deux conduc-

Fig. 125.



teurs de résistance r et r_1; ces deux conducteurs sont réunis, comme on dit, en *arc multiple;* appelons E la différence de potentiel des deux points A et B, i et i_1 les intensités des courants dérivés en r et r_1. Nous avons, dans chacune des deux branches,

$$E = ir \quad \text{et} \quad E = i_1 r_1;$$

d'où

$$i = \frac{E}{r} \quad \text{et} \quad i_1 = \frac{E}{r_1}.$$

L'intensité I du courant total qui passe entre A et B sera donc

$$I = \frac{E}{r} + \frac{E}{r_1} = \frac{E}{\dfrac{rr_1}{r+r_1}}.$$

Cette intensité est précisément la même que si les deux points A et B étaient réunis par un conducteur unique de résistance égale à

$$\frac{rr_1}{r+r_1},$$

et par conséquent l'expression ci-dessus représente la résistance de deux conducteurs réunis en arc multiple. Avec trois fils r, r_1, r_2 reliant les mêmes points A et B en arc multiple, on trouverait de même pour la résistance de l'arc

$$\frac{r r_1 r_2}{r r_1 + r_1 r_2 + r r_2}.$$

Supposons que sur un galvanomètre de résistance G on établisse une dérivation à l'aide d'un shunt de résistance S ; la résistance du galvanomètre *dérivé*, c'est-à-dire du galvanomètre et du shunt réunis en arc multiple, sera, d'après ce qui précède,

$$\frac{GS}{G+S}.$$

Posons $\frac{G+S}{S} = u = \frac{d}{d_1}$ (Chap. XIII, n° 14); on voit que la sensibilité du galvanomètre dérivé est à celle du galvanomètre non dérivé dans le rapport de 1 à u. En désignant par I l'intensité du courant principal, c'est-à-dire du courant qui traverse les autres parties du circuit, par i et i_1 les intensités des courants dérivés dans le galvanomètre et dans le shunt, on a

$$u = \frac{I}{i},$$

d'où

$$i = \frac{I}{u},$$

et, par suite,

$$i_1 = (I - i) = \frac{G}{u.S} \cdot I.$$

La résistance du galvanomètre dérivé est exprimée par

$$\frac{G}{u}.$$

Exemple. — Soit un galvanomètre dont la résistance est 8000 ohms. On demande la valeur du shunt qui rendra sa sensibilité 100 fois plus petite. Dans ce cas on a $u = 100$ et l'on trou-

vera S par l'équation $\frac{8000 + S}{S} = 100$; d'où $S = \frac{8000}{99} = 80^{\text{ohms}},8$.

La résistance du galvanomètre dérivé sera $\frac{8000}{100} = 80$ ohms.

4. La *conductibilité* d'un fil ou d'un conducteur est l'inverse de sa résistance.

On veut dire par là que si a est la résistance d'un fil, $\frac{1}{a}$ représente sa conductibilité; si la résistance d'un conducteur est 10 ohms, sa conductibilité sera 0,1.

La conductibilité d'un nombre quelconque de fils réunissant deux points en arc multiple est la somme des conductibilités de ces divers fils. En effet, dans un fil de résistance r, l'intensité du courant correspondant à une différence de potentiel E entre les extrémités est

$$\frac{E}{r}.$$

La somme des intensités des courants dans les fils de résistance $r, r_1, r_2, \ldots, r_n$ sera donc

$$E\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots + \frac{1}{r_n}\right).$$

Cette intensité est précisément celle du courant qui traverserait un conducteur unique, réunissant les deux points et de conductibilité égale à

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots + \frac{1}{r_n}.$$

La résistance des fils associés en arc multiple est l'inverse de la conductibilité de l'arc multiple. En appliquant cette règle on retombe sur l'expression de la résistance donnée au numéro 3.

Exemple. — Supposons que deux points soient réunis en arc multiple par des fils de résistances respectivement égales à 2, 18, 27 et 54 ohms. Les conductibilités de ces fils seront 0,5, 0,05555, 0,03704 et 0,01562. La somme des conductibilités est 0,6082, et la

résistance des quatre fils en arc multiple est égale à $\frac{1}{0,6082}$ ou $1^{\text{ohm}},644$.

5. On peut faire la comparaison de deux résistances en comparant les déviations produites sur le même galvanomètre par une pile donnée, quand on introduit tour à tour les deux résistances dans le circuit.

Soient

G la résistance du galvanomètre,
P la résistance de la pile,
R une résistance choisie à volonté parmi celles dont on dispose dans la caisse de résistances,
x la résistance inconnue qu'on veut mesurer ou comparer à R.

On observe d'abord la déviation d obtenue avec un circuit qui ne contient que G, P et R disposés dans un ordre quelconque, puis la déviation d_1 obtenue avec un circuit qui ne contient que G, P et x. Si le galvanomètre est un galvanomètre à miroir dont les déviations sont proportionnelles aux intensités des courants qui le traversent, on a, d'après la loi d'Ohm,

$$\frac{G + P + x}{G + P + R} = \frac{d}{d_1};$$

car la force électromotrice est la même dans les deux observations et les intensités des courants sont par conséquent en raison inverse des résistances totales.

Il en résulte

$$x = \frac{d}{d_1}(G + P + R) - (G + P). \tag{1}$$

Quand G et P sont assez petits pour qu'on puisse les négliger par rapport à R, on a approximativement

$$x = \frac{d}{d_1} R.$$

Ce cas se présente rarement; mais il arrive souvent, par exemple lorsque x est la résistance de quelque substance isolante, que l'on

peut considérer $G + P$ comme négligeable par rapport à x; dans ce cas, on a

$$x = \frac{d(G + P + R)}{d_1}, \tag{2}$$

Le nombre $d(G + P + R)$ s'appelle en télégraphie la *constante du galvanomètre* pour la pile employée.

Si $d_1 = 1$, la résistance totale du circuit est

$$x = d(G + P + R);$$

d'où cette définition souvent donnée de la constante : *C'est la résistance du circuit qui, avec un élément étalon, produit l'unité de déviation* (*une division*) *sur l'échelle du galvanomètre*.

Lorsqu'on se sert d'une boussole des tangentes, il faut évidemment remplacer dans les formules précédentes d et d_1 par $\tang d$ et $\tang d_1$; et pareillement, si l'on emploie une boussole des sinus, il faut écrire $\sin d$ et $\sin d_1$ à la place de d et d_1.

6. L'emploi des shunts permet d'étendre beaucoup l'application de cette méthode. Appelons S la résistance du shunt; la résistance du galvanomètre dérivé devient $\frac{GS}{G+S}$. Par suite, si l'on emploie le shunt S dans les deux observations de d et d_1, il faut, dans l'équation (1), remplacer G par $\frac{GS}{G+S}$, le seul effet du shunt étant de diminuer la résistance du galvanomètre; on aura alors, pour l'expression de la résistance,

$$x = \frac{d}{d_1}\left(\frac{GS}{G+S} + P + R\right) - \left(\frac{GS}{G+S} + P\right),$$

ou

$$x = \frac{d}{d_1}\left(\frac{G}{u} + P + R\right) - \left(\frac{G}{u} + P\right),$$

en posant, comme précédemment,

$$\frac{G+S}{S} = u.$$

On peut écrire

$$x = \frac{d}{d_1}\left(\frac{G}{u} + P + R\right),$$

en considérant comme négligeable par rapport à x la somme des résistances de la pile et du galvanomètre dérivé ou non.

La constante du galvanomètre dérivé est

$$d\left(\frac{G}{u} + P + R\right).$$

Mais supposons que l'on observe d avec le shunt inséré et d_1 sans le shunt; la sensibilité de l'instrument est différente dans les deux cas, et la formule qui donne la résistance x doit être modifiée.

Dans le circuit non dérivé, la résistance totale est $G + P + x$, la déviation d_1 et l'intensité du courant I_1; dans le circuit dérivé, la résistance totale est $\frac{G}{u} + P + R$, et l'intensité du courant dérivé dans le galvanomètre est $\frac{I}{u}$ (n° 3) correspondant à la déviation d.

On a, d'après la loi d'Ohm,

$$\frac{I}{I_1} = \frac{G + P + x}{\frac{G}{u} + P + R};$$

et, d'autre part,

$$\frac{\frac{I}{u}}{I_1} = \frac{d}{d_1},$$

ou

$$\frac{I}{I_1} = \frac{ud}{d_1}.$$

Par suite,

$$(2') \qquad \frac{ud}{d_1} = \frac{G + P + x}{\frac{G}{u} + P + R};$$

d'où

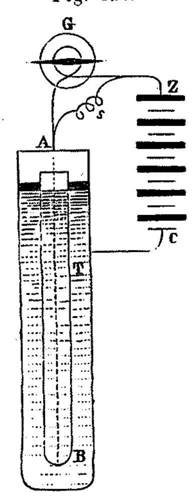
$$(3) \qquad x = u\,\frac{d}{d_1}\left(\frac{G}{u} + P + R\right) - (G + P).$$

La constante du galvanomètre non dérivé, c'est-à-dire la résistance pour laquelle $d_1 = 1$, est

$$ud\left(\frac{G}{u} + P + R\right).$$

Soit, par exemple, un shunt qui rende la sensibilité d'un galvanomètre 100 fois plus petite; si la déviation d est de 90 divisions et si les résistances G, P et R sont respectivement 8000, 20 et 4000 ohms, u étant d'ailleurs égal à 100, la constante sera 36 900 000. Comme on vient de le dire, ce nombre exprime la résistance totale du circuit comprenant G et P, dans lequel la pile employée donne la déviation 1 sur le galvanomètre non dérivé. Dans la pratique, on choisit pour R une valeur telle que la somme $\frac{G}{u} + P + R$ soit un nombre entier commode dans les calculs. Ainsi, dans le cas précédent, un observateur expérimenté aurait pris pour R la valeur particulière 3900, afin d'avoir pour la constante le nombre rond 36 000 000. Chaque galvanomètre est d'ordinaire muni d'une série de shunts capables de rendre, à volonté, la sensibilité du galvanomètre 10, 100, 1000 fois plus petite.

Fig. 126.



La constante est déterminée au début de l'expérience sur le galvanomètre non dérivé; cela fait, pour obtenir la valeur de la résistance en circuit qui fournit une déviation d_1 sans le shunt, il suffit de diviser la constante par d_1. Pour obtenir la valeur exacte de x, il faut retrancher de la constante la somme G + P; mais, lorsque cette somme est petite, on peut se dispenser de faire cette soustraction.

Cette méthode de mesure des résistances est souvent appliquée dans les essais de matières isolantes, telles que la gutta-percha. La pile et le fil recouvert de gutta-percha sont disposés comme l'indique la *fig.* 126.

Le courant négatif va du pôle zinc Z, à travers le galvanomètre dérivé, au fil de cuivre recouvert de gutta-percha; puis il traverse

l'enveloppe de gutta-percha pour se rendre dans l'eau qui remplit la cuve T, et revient de T au pôle cuivre C de la pile. La résistance x est la résistance de la gutta-percha.

7. La valeur de R dans les équations précédentes est toujours connue; celle de G ou de $\frac{G}{u}$ est aussi connue en général et, du reste, peut toujours être déterminée directement par l'expérience; elle peut être mesurée, par exemple, comme toute autre résistance, à l'aide d'un second galvanomètre. La valeur de P doit être déterminée au moins une fois par jour, parce que la résistance d'une pile quelconque varie notablement d'un jour à l'autre. Il y a plusieurs méthodes pour déterminer la valeur de P.

Première méthode. — C'est la méthode la plus communément employée :

On compose un circuit avec la pile P, le galvanomètre G et une caisse de résistances R; on dérive le galvanomètre en reliant ses bornes avec un shunt formé d'un bout de fil gros et court; puis on met en place toutes les chevilles de la caisse de résistances, de manière que R soit à peu près nul. Bien que le fil du shunt doive être assez gros et assez court pour que sa résistance reste négligeable par rapport à celle de la pile, on peut cependant lui donner une longueur telle qu'une déviation sensible D se manifeste sur le galvanomètre. La plus grande partie du courant est détournée par la dérivation; mais il en passe assez à travers le galvanomètre supposé sensible pour produire la déviation D. Dans ces conditions, la résistance totale du circuit est P, c'est-à-dire la résistance de la pile; car R est nul, et la résistance du shunt est infiniment petite. Actuellement on augmente la résistance de la caisse jusqu'à une certaine valeur R, en retirant des chevilles, et on note la déviation correspondante D_1.

On a, d'après la loi d'Ohm,

$$\frac{D}{D_1} = \frac{R + P}{P};$$

d'où

$$P = \frac{RD_1}{D - D_1}. \tag{4}$$

Si l'on fait $D_1 = \frac{D}{2}$, il vient

$$P = R.$$

Cette méthode présente un inconvénient grave : elle donne la valeur de la résistance de la pile au moment où celle-ci est traversée par un courant énergique qui accroît la force de polarisation. De plus, lors des observations de D et de D_1, les intensités des courants sont très différentes, et la polarisation elle-même est aussi très différente. Il en résulte que la loi d'Ohm n'est pas rigoureusement applicable, parce que la force électromotrice de la pile n'est pas absolument constante pendant la durée de l'expérience. Ajoutons qu'en employant avec cette méthode une pile d'une très faible résistance, on court le risque d'endommager les bobines de la caisse.

Deuxième méthode. — Dans cette méthode, on détermine la somme $P + G$; pour cela, on observe les déviations D et D_1 produites par la pile avec les deux circuits $P + G + R$ et $P + G + R_1$, et l'on a

$$\frac{P + G + R}{P + G + R_1} = \frac{D_1}{D};$$

d'où

$$P + G = \frac{R_1 D_1 - R D}{D - D_1}; \quad (5)$$

de la somme $P + G$ on déduit P si G est connu.

M. Varley recommande de prendre trois déviations D, D_1 et D_2 correspondant aux trois résistances R, R_1 et R_2, dans le but de vérifier si la polarisation trouble notablement le résultat de l'expérience; on règle les valeurs de R, R_1 et R_2 de manière que D_2 soit égal à $4D$ et D_1 égal à $2D$, et s'il n'y a pas de polarisation, on doit trouver que $R = 3R_1 - 2R_2$.

En effet, la formule (5) donne la suite des égalités

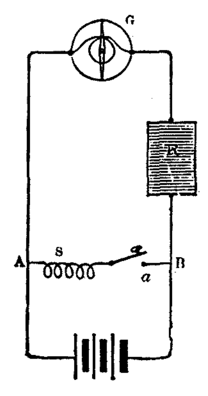
$$\frac{R_1 D_1 - RD}{D - D_1} = \frac{R_2 D_2 - RD}{D - D_2} = \frac{R_2 D_2 - R_1 D_1}{D_1 - D_2},$$

dans lesquelles on introduit les conditions $D_1 = 2D$ et $D_2 = 4D$.

Troisième méthode. — On établit les communications, comme

l'indique la *fig.* 127; soit D_1 la déviation obtenue quand le circuit est $P+R+G$; on insère ensuite le shunt de résistance connue S en faisant un contact en *a*, et l'on réduit R à une valeur R_1, telle que la déviation soit la même que précédemment; on a alors

Fig. 127.



$$(6) \qquad P = S\frac{R - R_1}{G + R_1}.$$

En effet, comme on l'a vu au numéro 6, le rapport des déviations D et D_1, dans les galvanomètres dérivé et non dérivé, est donné par la formule

$$(7) \qquad \frac{D}{D_1} = \frac{1}{u}\,\frac{G + P + R}{\dfrac{G + R_1}{u} + P};$$

$G+P+R$ est la résistance totale du circuit avant l'insertion du shunt et $\frac{G+R_1}{u}+P$ après l'insertion; ici u est évidemment égal à

$$\frac{G + R_1 + S}{S}.$$

Si l'on fait $D = D_1$, il vient

$$P + R = Pu + R_1;$$

d'où

$$P = S\frac{R - R_1}{G + R_1}.$$

Quatrième méthode. — Une quatrième manière de déterminer P consiste à laisser la résistance R invariable et à observer les déviations D_1 et D avant et après le contact en *a*. On peut représenter par G la résistance du circuit galvanométrique jusqu'aux bornes du shunt; alors la résistance totale du circuit non dérivé est $G+P$, et celle du circuit dérivé $\frac{G}{u}+P$; d'ailleurs u est ici égal à $\frac{G+S}{S}$.

On a, d'après la formule (7),

$$\frac{D}{D_1} = \frac{1}{u}\,\frac{G + P}{\frac{G}{u} + P}, \tag{7'}$$

d'où l'on déduit

$$P = \frac{S(D_1 - D)}{D - (D_1 - D)\frac{S}{G}}.$$

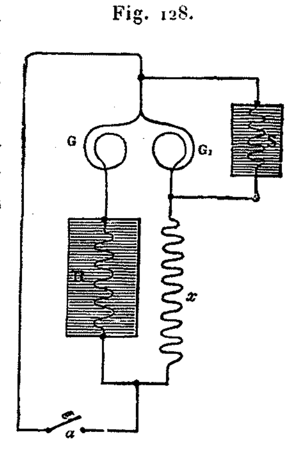
En supposant que S soit très petit par rapport à G, on pourra négliger le second terme du dénominateur et écrire approximativement

$$P = S\,\frac{D_1 - D}{D}. \tag{8}$$

Cette méthode s'applique spécialement aux piles d'une très faible résistance.

8. L'exactitude avec laquelle une résistance peut être mesurée par l'une quelconque des méthodes précédentes n'a d'autres limites que la précision avec laquelle une déviation peut s'observer. Si l'on ne peut garantir l'exactitude d'une déviation à un centième près de sa valeur, on est encore moins assuré que la résistance, calculée d'après cette déviation, est exacte à un centième près. Les méthodes suivantes, qui peuvent toutes être désignées sous le nom de *méthodes différentielles,* comportent un plus grand degré d'exactitude. On a déjà décrit (Chap. IV, nº 3) la plus simple des méthodes différentielles; la *fig.* 128 montre de quelle manière les communications doivent être établies. Avec un galvanomètre sensible, cette méthode est susceptible d'une extrême exactitude, car en augmentant la puissance de la pile on peut augmenter à volonté la déviation produite par la différence entre les intensités des courants qui circulent dans les deux branches. On peut encore insérer,

Fig. 128.



sur l'une ou l'autre branche du galvanomètre, un shunt $\left(\frac{1}{u}\right)$ capable de rendre u fois plus petite sa résistance et sa sensibilité. Appelons G la résistance de chaque bobine de l'appareil et supposons que l'aiguille du galvanomètre ne dévie pas quand on ferme le circuit. Si la résistance connue R est placée sur la branche qui porte le shunt, la résistance totale de cette branche dérivée sera $\frac{G}{u} + R$; la résistance de la branche non dérivée sera $G + x$. En appliquant la formule (2') [n° 6], on a

$$\frac{uD}{D_1} = \frac{G + x}{\frac{G}{u} + R}$$

et par suite, en faisant $D = D_1$

$$\frac{1}{u}(x + G) = \frac{G}{u} + R;$$

d'où

$$x = uR. \tag{9}$$

Si au contraire, comme dans la figure, c'est la résistance inconnue x qui est placée sur la branche dérivée, on a, d'après la même formule,

$$\frac{1}{u}(G + R) = \frac{G}{u} + x;$$

d'où

$$x = \frac{R}{u}.$$

On peut mesurer aisément de cette manière des résistances 1000 fois plus grandes ou 1000 fois plus petites que R. Pour que ce procédé conduise à des résultats exacts, il faut que le nombre u, qui donne le rapport de sensibilité, soit connu avec une extrême précision et qu'il demeure constant. Or on a

$$u = \frac{G + S}{S};$$

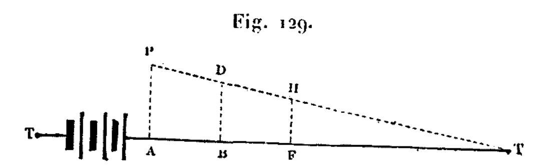
si donc la résistance de G ou de S varie pendant l'expérience, les résultats seront erronés.

Quand le fil du galvanomètre différentiel est en cuivre, les fils des shunts doivent être aussi en cuivre, afin que la valeur de u soit constante à toutes les températures; mais, même avec cette précaution, le simple passage du courant employé dans l'expérience suffit pour modifier la valeur de u. En effet, il s'écoule à travers le shunt un courant beaucoup plus intense qu'à travers le galvanomètre; par suite, il y a plus de chaleur engendrée dans le shunt que dans la bobine du galvanomètre. En outre, cette chaleur est dans le shunt concentrée sur une masse de métal relativement petite. Il en résulte que la résistance du shunt est augmentée par rapport à celle du galvanomètre, à chaque passage du courant. Cette circonstance diminue de beaucoup les avantages de cette méthode. Les galvanomètres différentiels dont le fil est en argent allemand donnent des résultats beaucoup plus exacts que les instruments formés de fil de cuivre, parce que la résistance des premiers ainsi que celle de leurs shunts sont moins influencées par la température. Le circuit doit être tenu fermé aussi peu de temps que possible; à cet effet, un manipulateur établi en a (*fig.* 128) permet d'interrompre la communication, aussitôt qu'on a observé une déviation à droite ou à gauche. Toutefois, cette manière de procéder peut conduire à des erreurs, si la résistance inconnue x est disposée de telle sorte qu'une induction du courant sur lui-même puisse s'y produire ou si le conducteur x a une capacité électrostatique sensible, comme un fil recouvert de gutta-percha et plongé dans l'eau. Dans ces deux cas, l'intensité du courant ne croît pas avec la même vitesse dans chaque branche, au moment où l'on établit le contact. Si les bobines de résistance R sont convenablement enroulées, tandis que la résistance x est une simple bobine dont le fil n'est pas enroulé en double, le courant de x (Chap. III, n° 21) sera retardé dans son développement, et par suite un contact momentané en a fera toujours paraître x plus grand que R, quand même x et R seraient réellement égaux. Il faut dans ce cas ne pas tenir compte du premier mouvement de l'aiguille et mesurer x au moyen de la déviation permanente qui s'établit après que les courants sont devenus constants dans les deux branches.

9. Lorsqu'un courant permanent ou d'intensité constante I, qui traverse un conducteur R, est produit par une différence de potentiel E entre les extrémités de ce conducteur, la différence de potentiel e entre deux points intermédiaires quelconques séparés par une résistance r doit être égale, d'après la loi de Ohm, à Ir. La différence de potentiel de deux points du conducteur sera d'autant moindre que la résistance comprise entre ces deux points sera plus faible. Si l'une des extrémités du conducteur est au potentiel zéro, c'est-à-dire en communication avec le sol, le potentiel d'un autre point est proportionnel à la résistance comprise entre la terre et le point considéré; ce potentiel sera toujours égal à Ir.

Supposons (*fig.* 129) que la ligne AT représente, à une échelle

Fig. 129.



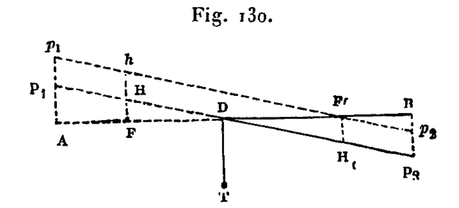
quelconque, la longueur d'un conducteur uniforme, c'est-à-dire de nature et de section constantes, reliant la pile à la terre T, et que l'ordonnée AP représente aussi à une échelle quelconque la force électromotrice de la pile; si l'on mène la droite PT, l'ordonnée FH représentera le potentiel du conducteur au point F. En admettant, par exemple, que AP soit égal à 12 volts et que F soit à égale distance de A et de T, on voit que l'ordonnée FH sera la moitié de l'ordonnée AP; le potentiel du conducteur au point F sera égal à 6 volts.

Si A est séparé de T par plusieurs conducteurs de résistances différentes, la ligne AT doit figurer, dans le diagramme, non plus la simple longueur, mais la *résistance totale* du circuit interpolaire. L'ordonnée FH représentera encore, comme précédemment, le potentiel en un point F séparé de T par une *résistance* égale à FT; et si F occupe une position telle, que la résistance de FT soit égale à celle de AF, le potentiel de F sera la moitié de celui de A, de quelque manière que les résistances AF et FT soient formées.

La différence de potentiel entre B et F est égale à la différence des ordonnées BD et FH.

Supposons maintenant (*fig.* 130) que les deux extrémités de la résistance ADB soient réunies aux pôles d'une pile isolée, et qu'au point D, milieu de cette résistance, le conducteur communique avec le sol. Le potentiel en ce point est zéro; mais la différence de

Fig. 130.



potentiel entre A et B est à peu près égale à la force électromotrice de la pile, en supposant que la résistance du circuit interpolaire AB soit très grande par rapport à la résistance de la pile; par suite, on tracera deux ordonnées, l'une positive AP_1, l'autre négative BP_2, égales chacune à la moitié de cette force électromotrice. La somme des deux lignes AP_1 et BP_2 sera égale à AP, si l'on appelle AP la force électromotrice de la pile, comme on le voit dans la *fig.* 129. Les ordonnées FH et F_1H_1 représentent les potentiels aux points F et F_1, l'un mesuré au-dessus de l'horizontale AB ou positif et l'autre mesuré au-dessous de cette ligne ou négatif. La différence de potentiel entre F et F_1 est la somme des lignes FH et F_1H_1. On reconnaît aisément que cette différence demeure la même, quel que soit le point de AB relié à la terre, si la pile est isolée. Supposons par exemple, que l'on mette à la terre F_1 au lieu de D; la droite p_1p_2 devient la igne figurative des potentiels, et Fh marque la différence de potentiel entre F et F_1; or Fh est égal à $FH + F_1H_1$.

10. Supposons qu'à l'aide d'une pile on maintienne la même différence de potentiel AP entre les extrémités de deux conducteurs de résistances différentes représentés par les lignes AT et A_1T_1 (*fig.* 131), et pour plus de simplicité admettons que le potentiel aux points T et T_1 soit zéro. Si nous choisissons sur AT et A_1T_1 deux points B et B_1 tels que l'on ait

$$\frac{AB}{BT} = \frac{A_1B_1}{B_1T_1},$$

la ligne BD sera égale à B_1D_1. En effet, on déduit de la condition précédente

$$\frac{AT}{BT} = \frac{A_1T_1}{B_1T_1},$$

et une simple considération de triangles semblables donne

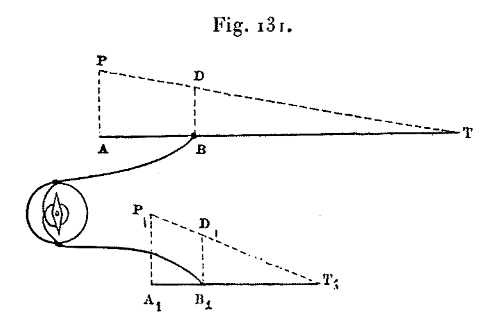
$$\frac{AT}{BT} = \frac{AP}{BD} = \frac{A_1T_1}{B_1T_1} = \frac{A_1P_1}{B_1D_1},$$

et comme par hypothèse $AP = A_1P_1$, on a

$$BD = B_1D_1.$$

Ainsi les potentiels en B et B_1 sont égaux. Si donc on réunit B et B_1 par un conducteur, aucun courant ne passe de B à B_1; un galvanomètre placé sur ce fil de communication entre B et B_1 ne manifestera

Fig. 131.



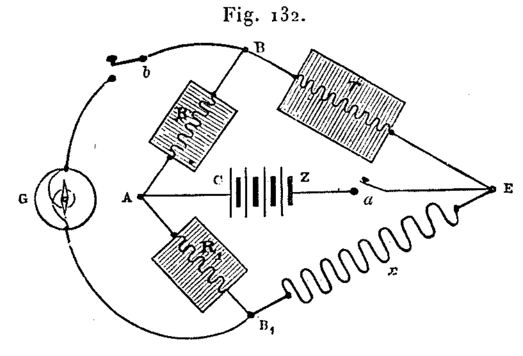
aucune déviation, quel que soit son degré de sensibilité et si grande que soit la force électromotrice AP qui produit les courants à travers les conducteurs AT et A_1T_1. Si le fil de communication ou le *pont,* comme on l'appelle, réunit le point B à un point de A_1T_1 situé entre B_1 et T_1, un courant venant de AT traversera le pont; si au contraire le pont réunit B à un point situé entre B_1 et A_1, un courant opposé, venant de A_1T_1, franchira le pont et traversera le galvanomètre en sens contraire.

Si donc nous connaissons le rapport des résistances AB et BT, rapport facile à établir quand ces deux résistances sont formées de bobines graduées, nous pourrons diviser une résistance A_1T_1 dans le même rapport, en cherchant simplement le point B_1, pour lequel aucun courant ne traverse le pont.

Pareillement, si A_1B_1 est une résistance connue, nous pourrons déterminer expérimentalement une résistance B_1T_1 qui soit avec A_1B_1 dans le même rapport que BT se trouve avec AB.

11. Les principes que nous venons d'exposer dans les deux numéros précédents fournissent la méthode la plus commode pour mesurer les résistances. Le *pont*, comme on l'appelle en termes techniques, est disposé comme l'indique la *fig.* 132.

Fig. 132.



Quatre conducteurs AB, BE, AB_1 et B_1E sont reliés en B et B_1 aux bornes d'un galvanomètre, et en A et E aux pôles d'une pile dont le courant traverse ABE et AB_1E; ces deux conducteurs répondent aux lignes ABT et $A_1B_1T_1$ dans la *fig.* 131. La différence de potentiel entre A et E dépend de la pile employée; mais elle est évidemment la même pour les extrémités A et E des deux circuits ABE et AB_1E.

Soient :

R la résistance entre A et B, R_1 celle entre A et B_1,
r celle entre   celle entre B_1 et E.

Cette dernière est la résistance inconnue que l'on se propose de mesurer; R, R_1 et r sont ordinairement des bobines de résistance.

On choisit pour R et r deux résistances telles que leur rapport soit constant et commode dans les calculs; ce sera, par exemple, l'un des nombres 1, 10, 100 ou 1000; puis on modifie la résistance R_1 jusqu'à ce qu'aucun courant ne traverse le galvanomètre G. Quand cela a lieu, on a

$$\frac{R}{r} = \frac{R_1}{x},$$

d'où

$$x = \frac{r}{R} R_1$$

Si le rapport $\frac{r}{R} = \frac{1}{100}$, la résistance x sera la centième partie de la résistance R_1.

Cette méthode offre de grands avantages. D'abord on peut se servir d'un galvanomètre quelconque; toutefois plus l'instrument est sensible, plus la mesure de x est précise. En second lieu, il n'est pas nécessaire que la résistance du galvanomètre demeure constante. Les bobines R, R_1 et r sont en fil d'argent allemand ou de tout autre alliage dont la résistance varie peu avec la température. On dispose dans le circuit deux manipulateurs, l'un en a et l'autre en b; aucun courant ne circule sur les quatre conducteurs avant que le contact soit établi en a; on attend, après le contact, que les courants aient atteint leur régime permanent dans les quatre conducteurs; ce résultat obtenu, on fait un contact en b pour reconnaître si le galvanomètre est traversé par un courant. S'il n'y a pas de courant dans le galvanomètre, le contact établi en b ne modifie l'intensité du courant dans aucun des quatre conducteurs. On choisit ordinairement pour R et r des valeurs telles que leur rapport soit une puissance de 10 comprise entre 1000 et $\frac{1}{1000}$. Les deux manipulateurs en a et b sont souvent mis en jeu au moyen de la même touche; celle-ci établit d'abord le contact en a, puis, un instant après, le contact en b.

Les trois résistances R, R_1 et r, ainsi que celle du galvanomètre, doivent être faibles si la résistance x est faible, et grandes si la résistance x est grande. Quand la résistance x est très faible, ABE est souvent formé d'un simple fil de diamètre uniforme; R_1 est maintenu constant, et l'on fait glisser le point de contact B, le long du fil ABE, jusqu'à ce que le galvanomètre ne soit parcouru par aucun courant. Ce résultat obtenu, le rapport des résistances $\frac{r}{R}$ est le rapport des longueurs mêmes $\frac{BE}{AB}$ mesurées sur une échelle contre laquelle est tendu le fil ABE.

Un alliage d'argent et de platine contenant 33,4 pour 100 de platine donne un fil très convenable pour cette mesure. Ce fil doit être en métal très dur; sinon les allées et venues du curseur B détruiraient bientôt par l'usure l'uniformité de sa section et par suite altéreraient sa résistance.

Quand x est faible, il faut avoir grand soin de rendre insensible la résistance des conducteurs qui servent à relier entre elles les bobines ou les fils R, r et R_1 et la résistance x; dans ce but, on peut prendre pour ces conducteurs de fortes tiges de cuivre de $0^m,005$ de diamètre; on établit les contacts en plongeant les extrémités de ces tiges dans des coupes remplies de mercure, après les avoir amalgamées.

Le pont sert à mesurer la résistance de la gaîne de gutta-percha employée pour isoler le fil conducteur des câbles sous-marins. A cet effet, E est mis en communication avec la terre; la pile est soigneusement isolée et le fil soumis à l'expérience est fixé en B_1 par l'une de ses extrémités, et isolé à l'autre extrémité, au lieu d'être relié avec E, comme dans le cas ordinaire. Ce fil isolé est plongé dans une cuve pleine d'eau non isolée ou dans la mer; il en résulte que la seule communication possible entre B_1 et E a lieu à travers l'enveloppe isolante du câble. La résistance de cette enveloppe est donc la résistance x.

Lorsque les fils ont été ainsi disposés sur le pont, on peut, en reliant avec E le bout isolé du fil conducteur du câble, déterminer la résistance de ce fil, soit avant de mesurer la résistance de l'enveloppe, soit après avoir effectué cette mesure.

Quand aucun courant ne traverse le pont, les positions de la pile et du galvanomètre peuvent être interverties; aucun courant ne passera de A à E à travers le galvanomètre.

12. Lois de Kirchhoff. *Première loi.* — Supposons (*fig.* 133) qu'un certain nombre de courants d'intensités i_1, i_2, i_3,... passent tous par un même point A, les uns se dirigeant vers ce point et les autres s'en éloignant. Comme la quantité d'électricité qui arrive au point d'entre-croisement doit être égale à la quantité qui s'écoule de ce point, la somme des intensités des courants dirigés vers A doit être égale à la somme des intensités des courants s'éloignant de A. Par conséquent, si l'on considère les premiers comme positifs et les

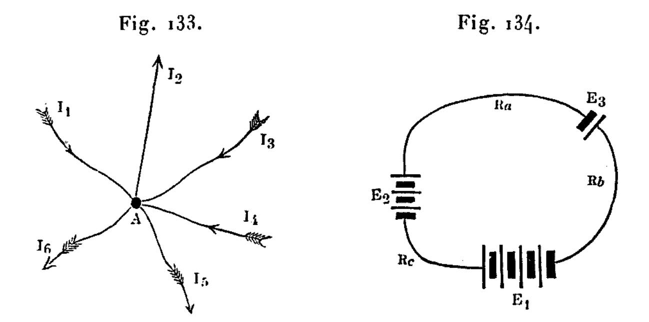
seconds comme négatifs, on peut dire que la somme algébrique des intensités des courants passant tous par un même point est nulle. Ce résultat s'exprime par la formule suivante :

$$\Sigma i = 0,$$

la lettre Σ indiquant que la sommation s'étend à tous les courants.

Seconde loi. — Supposons (*fig.* 134) qu'il y ait, dans un circuit, plusieurs forces électromotrices E_1, E_2, E_3, agissant les unes dans

Fig. 133. Fig. 134.



un sens et les autres en sens contraire, et réunies par les résistances R_a, R_b, R_c. Soient I_a, I_b, I_c les intensités respectives des courants qui traversent ces résistances; $P_a - p_a$ la différence de potentiel ou la force électromotrice qui existe entre les deux extrémités de R_a; $P_b - p_b$ celle qui existe entre les deux extrémités de R_b et enfin $P_c - p_c$ celle qui existe entre les deux extrémités de R_c. On a, d'après la loi de Ohm, les trois égalités suivantes :

$$I_a R_a = P_a - p_a, \quad I_b R_b = P_b - p_b, \quad I_c R_c = P_c - p_c;$$

d'où

$$\begin{aligned} I_a R_a + I_b R_b + I_c R_c &= P_a - p_a + P_b - p_b + P_c - p_c \\ &= (P_a - p_c) + (P_b - p_a) + (P_c - p_b). \end{aligned}$$

Or $P_a - p_c$ est la différence de potentiel produite par la force électromotrice E_2; en effet, quelles que soient les valeurs absolues, basses ou élevées, des potentiels P_a et p_c, la différence des potentiels de deux points doit être égale, par définition, à la force élec-

tromotrice qui existe entre ces points. De même on a $P_b - p_a = E_3$ et $P_c - p_b = E_1$. Il vient donc

$$E_1 + E_2 + E_3 = I_a R_a + I_b R_b + I_c R_c,$$

ou

$$\Sigma E = \Sigma IR. \tag{10}$$

En langage ordinaire, on dit que *la somme algébrique de toutes les forces électromotrices existant dans un circuit fermé est égale à la somme des produits de l'intensité de chaque courant par la résistance qu'il traverse.*

Dans ce qui précède, on a supposé que la force électromotrice était due à une certaine différence de potentiel engendrée en un point déterminé du circuit sous l'influence d'un électromoteur, tel qu'une pile. Cette loi de Kirchhoff s'applique encore au cas où la force électromotrice est produite, non plus en un point, mais sur toute l'étendue ou une partie seulement de la longueur du conducteur. Telle est, par exemple, la force électromotrice engendrée sans différence de potentiel sous l'influence de l'induction électromagnétique; dans ce cas, on connaît seulement, pour chaque partie du circuit, la valeur de la force électromotrice par centimètre de longueur. En faisant la somme de toutes les forces électromotrices qui existent sur chaque unité de longueur, on obtient la force électromotrice totale; or on trouve que l'intensité du courant multipliée par la résistance totale du circuit est égale à la force électromotrice ainsi calculée; en d'autres termes, la loi de Ohm est parfaitement applicable à ce cas.

Les résultats auxquels nous sommes parvenus au commencement de ce Chapitre se déduisent aisément des lois de Kirchhoff.

13. La formule du pont peut s'établir comme il suit, au moyen de ces lois :

Soient cinq conducteurs r, r_1, r_2, r_3, r_4, disposés comme l'indique la *fig.* 135; une pile E est reliée par d'autres conducteurs aux points A et A_1. Dans les six parties du circuit ainsi formé circulent six courants dont les intensités sont i, i_1, i_2, i_3, i_4, I; i étant l'intensité du courant qui passe dans r, i_1 celle du courant qui

passe dans r_1, ..., et enfin I celle du courant principal extérieur au pont.

Aux points A et A_1, on a, par la première loi de Kirchhoff,

$$I = i_1 + i_3 = i_2 + i_4,$$

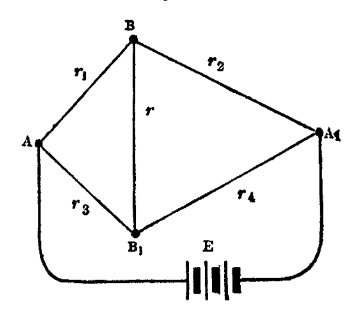
et aux points B et B_1

$$i = i_1 - i_2 = i_4 - i_3.$$

La seconde loi de Kirchhoff donne, dans le circuit fermé ABB_1,

$$ir = i_3 r_3 - i_1 r_1,$$

Fig. 135.



et, dans le circuit fermé BA_1B_1,

$$ir = i_2 r_2 - i_4 r_4.$$

Entre les six équations qui précèdent on peut éliminer i_1, i_2, i_3 et i_4, et l'on arrive à une équation entre i et I :

$$i = \frac{r_3 r_2 - r_1 r_4}{(r_1 + r_3)(r_2 + r_4) + r(r_1 + r_2 + r_3 + r_4)} I.$$

Cette expression donne l'intensité du courant passant à travers le pont r en fonction de l'intensité totale I du courant fourni par la pile. Si aucun courant ne passe dans r, on doit avoir

$$r_3 r_2 - r_1 r_4 = 0,$$

d'où

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}.$$

14. La *résistance spécifique* d'une substance rapportée à l'unité de volume est la résistance opposée par un cube de volume 1 au courant qui traverse deux faces opposées. La Table qui suit contient les résistances spécifiques de divers métaux et alliages à 0° C. Les résistances spécifiques inscrites dans cette Table sont celles d'un centimètre cube de chaque substance chimiquement pure ; elles ont été calculées d'après les expériences de Matthiessen. La résistance des métaux du commerce est toujours plus élevée que celle des métaux purs, et souvent la différence est très grande ; il n'est pas du tout rare, par exemple, de rencontrer du cuivre ayant une résistance supérieure de 50 pour 100 à celle portée dans la Table. Cette augmentation de la résistance est due à la présence de métaux étrangers en petites quantités. Le plomb, l'étain, le zinc et le cadmium, quand ils forment un alliage avec un autre métal, conduisent l'électricité comme si les parties constituantes de l'alliage étaient demeurées séparées et se trouvaient disposées sous forme d'un faisceau de conducteurs, dont chacun aurait une section uniforme dans toute sa longueur. Les alliages de bismuth, d'antimoine, de platine, de palladium, de fer, d'aluminium, d'or, de cuivre, d'argent, de mercure et probablement de la plupart des autres métaux, ont une résistance beaucoup plus grande que la résistance moyenne des éléments qui les constituent. On trouve dans la Table la résistance d'un fil de chaque métal de 1^{m} de longueur et de $0^{m},001$ de diamètre ; elle est égale au produit de la résistance spécifique multipliée par le coefficient $\frac{10\,000}{0,7854}$ ou 12732. Les résistances des fils sont exprimées en ohms et les résistances spécifiques en microhms.

Nota. — Les nombres marqués d'un astérisque sont les résultats des expériences du Dr Matthiessen (*Rapport à l'Association Britannique,* 1864). Les nombres donnés dans la colonne 2 sont obtenus par le calcul ; le nombre 0,2526 qui se rapporte au plomb est déduit, à l'aide du poids spécifique 11,376, du résultat direct inscrit dans la colonne 3 ; les autres nombres de la colonne 2 sont inversement proportionnels aux pouvoirs conducteurs déterminés par le Dr Matthiessen, le pouvoir conducteur de l'argent non recuit et étiré étant représenté par 100, et celui de l'alliage

TABLE

des résistances spécifiques de divers métaux et alliages à 0° C., d'après les expériences de Matthiessen.

NOMS DES MÉTAUX.	RÉSISTANCE d'un cube de 0m,01 de côté entre deux faces opposées, 1	RÉSISTANCE d'un fil de 1m de longueur et de 0m,001 de diamètre. 2	RÉSISTANCE d'un fil de 1m de longueur et du poids de 1gr. 3	RÉSISTANCE d'un fil de 1 pied de longueur et de $\frac{1}{1000}$ de pouce de diamètre. 4	RÉSISTANCE d'un fil de 1 pied de longueur et du poids de 1 grain. 5
	Microhms	Ohms	Ohms	Ohms	Ohms
Argent recuit	1,521	0,01937	0,1544	9,151	0,2214
» non recuit étiré à la filière	1,652	0,02103	0,1680*	9,936	0,2415
Cuivre recuit	1,616	0,02057	0,1440	9,718	0,2064
» non recuit étiré à la filière	1,652	0,02104	0,1469*	9,940	0,2106
Or recuit	2,081	0,02650	0,4080	12,52	0,5849
» non recuit étiré à la » filière	2,118	0,02697	0,4150*	12,74	0,5950
Aluminium recuit	2,945	0,03751	0,0757	17,72	0,1085
Zinc comprimé	5,689	0,07244	0,4067	34,22	0,5831
Platine recuit	9,158	0,1166	1,96	55,09	2,810
Fer recuit	9,825	0,1251	0,7654	59,10	1,097
Nickel recuit	12,60	0,1604	1,071	75,78	1,535
Étain comprimé	13,36	0,1701	0,9738	80,36	1,396
Plomb comprimé	19,85	0,2526	2,257*	119,39	3,236
Antimoine comprimé	35,90	0,4571	2,411	216	3,456
Bismuth comprimé	132,7	1,689	13,03	798	18,64
Mercure liquide	99,74	1,2247	13,06*	578,6	18,72
Alliage d'argent et de platine non recuit ou recuit (2 parties d'argent et 1 partie de platine)	24,66	0,3140	2,959	148,35	4,243
Argent allemand (maillechort) non recuit ou recuit.	21,17	0,2695	1,85	127,32	2,652
Alliage d'argent et d'or non recuit ou recuit (1 partie d'argent et 2 parties d'or).	10,99	0,1399	1,668*	66,10	2,391

d'argent et d'or par 15,03. La colonne 3 est formée en calculant, d'après la colonne 2, à l'aide des poids spécifiques, les valeurs pour le zinc, le platine, le fer, le nickel, l'étain, l'antimoine, le bismuth et le mercure; pour les valeurs qui se rapportent aux trois alliages, on a pris les poids spécifiques donnés par le Dr Matthiessen. Les nombres relatifs à l'argent, au cuivre, à l'or recuits sont déduits par proportion des valeurs directes obtenues pour ces métaux non recuits et étirés à la filière. Excepté pour le plomb, les nombres marqués d'un astérisque ne sont pas d'accord avec les valeurs qu'on tire par le calcul de la colonne 2 en se servant des poids spécifiques exacts. On forme la colonne 4 au moyen de la colonne 2, en multipliant les nombres de cette dernière colonne par 472,45, et la colonne 5 au moyen de la colonne 3, en multipliant les nombres de cette dernière colonne par 1,4337. Enfin on obtient la colonne 1 au moyen de la colonne 2, en divisant les nombres de celle-ci par 12732. Il faut se rappeler, au sujet des colonnes 4 et 5, que le pied anglais vaut $0^{m},305$, le pouce anglais $25^{mm},4$ et le grain $0^{gr},065$.

15. La *conductibilité spécifique* d'une substance est l'inverse de sa résistance spécifique. Ainsi la conductibilité spécifique de l'argent non recuit, exprimée en ohms, est $\frac{1}{0,000\,001\,652}$ ou 605300. On a l'habitude de rapporter les conductibilités des corps à celle d'une substance déterminée telle que l'argent. C'est une pratique très fâcheuse; il en est résulté que de nombreuses expériences faites avec le plus grand soin par d'habiles électriciens ont perdu toute valeur, car il ne se trouve pas deux expérimentateurs qui aient pris pour métal de comparaison un métal de même conductibilité. D'ailleurs les valeurs relatives des conductibilités des divers métaux choisis comme étalons ne sont pas connues. Les expériences mêmes de Matthiessen ne permettent pas de construire à ce sujet une table entièrement satisfaisante.

On doit remarquer que le cuivre est de tous les métaux celui qui a la plus grande conductibilité ou la plus faible résistance spécifique, c'est-à-dire à égalité de longueur et de section; l'aluminium est le métal qui a la plus petite résistance à égalité de longueur et de poids. Ces propriétés sont souvent d'une grande importance.

16. La résistance spécifique de tous les métaux augmente avec la température, et Matthiessen a trouvé que la loi de cet accroissement est la même pour tous les métaux, excepté le fer et le thallium. La résistance R d'un métal ou d'un alliage à une température t exprimée en degrés centigrades peut se déduire de la résistance r à 0° C. au moyen de la formule suivante :

$$R = r(1 + at \pm bt^2), \tag{11}$$

a et b étant deux coefficients constants pour un même métal ; b est positif pour certains métaux et négatif pour d'autres.

On a, pour la plupart des métaux purs,

$$a = 0{,}003824 \text{ et } b = 0{,}00000126.$$

Pour le mercure

$$a = 0{,}0007485 \quad \text{et} \quad b = -0{,}000000398.$$

Pour l'argent allemand

$$a = 0{,}0004433 \quad \text{et} \quad b = 0{,}000000152.$$

Pour l'alliage d'argent et de platine

$$a = 0{,}00031.$$

Pour l'alliage d'argent et d'or

$$a = 0{,}0006999 \quad \text{et} \quad b = -0{,}000000062.$$

Suivant les expériences de Siemens, la résistance R pour une température quelconque T jusqu'à 1000° C. environ est exprimée par la formule générale (*Bakerian Lecture*, 1871)

$$R = \alpha T^{\frac{1}{2}} + \beta T + \gamma.$$

La présence d'une très petite quantité de matières étrangères augmente notablement la résistance spécifique d'un métal et atténue aussi la variation que le changement de température produit sur cette résistance.

Le fil de cuivre fourni par l'industrie pour la fabrication des câbles a ordinairement une résistance spécifique de 5 à 8 pour 100 plus élevée que celle du cuivre pur recuit. L'essai du fil se fait habi-

tuellement à 24° C.; à cette température la résistance de 1 mètre-gramme de fil de cuivre pur, c'est-à-dire d'un fil de cuivre pur, long d'un mètre et pesant 1^{gr}, est égale à $0^{ohm},1585$. D'après le cahier des charges, la résistance du cuivre destiné à la fabrication du câble atlantique français ne devait pas dépasser, à 24° C., $0^{ohm},1713$ pour 1 mètre-gramme; en réalité la résistance moyenne pour 1 mètre-gramme à 24° C. a été de $0^{ohm},1667$. En appelant R la résistance par mille marin ou 1855^{m}, P le poids en kilogrammes par mille et S la résistance par mètre-gramme, on a

$$R = 3440 \frac{S}{P}. \tag{12}$$

La résistance du fer employé en Télégraphie est, d'après Latimer Clark, sept fois plus grande que celle du cuivre pur, c'est-à-dire égale à $1^{ohm},09$ par mètre-gramme à 24° C.; pour des échantillons différents, les résultats varient notablement.

17. La résistance spécifique des substances isolantes ne peut être indiquée dans une table avec autant de simplicité que celle des métaux; car de légères modifications dans le mode de préparation de ces substances amènent des différences considérables dans la résistance spécifique; et, d'autre part, il faut tenir compte aussi de l'influence du temps et des effets de polarisation [1] ou d'électrisation. La gutta-percha et le caoutchouc dont on se sert pour isoler les câbles sous-marins ont été l'objet d'un très grand nombre d'expériences faites avec soin. A la température de 24° C., et au bout d'une minute de charge, la résistance d'un centimètre cube de gutta-percha, préparée depuis quinze jours, varie de 25 millions de mégohms environ jusqu'à 500 millions de mégohms et plus. La valeur moyenne de la résistance spécifique de la gutta-percha employée pour la fabrication du câble atlantique de 1865 était de 342 millions de mégohms, après une minute de charge. Le caoutchouc de bonne qualité a une résistance encore plus considérable. Le câble du golfe Persique fabriqué par Hooper avait une résistance spécifique d'environ 7500 millions de mégohms.

[1] La polarisation ou électrisation produit un accroissement apparent de la résistance. Le phénomène a été décrit au Chapitre IV (n°10).

Soit R la résistance d'une couche cylindrique de gutta-percha, d'épaisseur L, prise normalement à l'axe, c'est-à-dire en allant du fil intérieur (âme du câble) vers l'eau extérieure; c'est cette résistance qu'on appelle ordinairement la *résistance d'isolement* du câble. Si l'on désigne par ρ la résistance spécifique de la matière isolante, c'est-à-dire la résistance rapportée à l'unité de volume, et par $\frac{D}{d}$ le rapport des diamètres de l'enveloppe et du conducteur, on a pour la résistance d'isolement R

$$(13) \qquad R = 0,3665 \frac{\rho \log \frac{D}{d}}{L}.$$

Les quantités L et ρ doivent être exprimées en unités du même système; par exemple, si la résistance spécifique ρ est rapportée au centimètre cube, il faut exprimer dans cette formule la longueur L en centimètres.

La résistance R_m de 1 mille de câble a pour expression

$$(14) \qquad R_m = \frac{\rho}{506\,300} \log \frac{D}{d},$$

ρ étant la résistance spécifique rapportée, comme précédemment, au centimètre cube. La valeur du coefficient $\frac{\rho}{506\,300}$ adoptée par Latimer Clark pour la gutta-percha à la température de 24° C. est 769, nombre qui correspond à une valeur de ρ égale à 389 millions de mégohms; c'est une valeur élevée.

La résistance d'isolement ou le pouvoir isolant de la gutta-percha croît avec la pression. Soient R_p la résistance à la pression p exprimée en kilogrammes par centimètre carré, ou, ce qui revient au même, en atmosphères, et R la résistance à la pression atmosphérique ordinaire; on aura approximativement

$$(15) \qquad R_p = R\,(1 + 0,00327\,p).$$

La constante 0,00327 doit d'ailleurs varier un peu avec les divers échantillons de gutta-percha et avec la température. Enfin la résistance de la gutta-percha paraît s'accroître notablement avec le temps quand elle séjourne dans l'eau. Cette propriété n'a pas été

constatée sur le caoutchouc. M. Siemens a trouvé que la résistance de quelques échantillons de caoutchouc décroît quand la pression augmente.

18. On peut calculer de la manière suivante la résistance d'une substance isolante qui sépare deux corps conducteurs.

Supposons qu'on ait électrisé à un potentiel V un conducteur de capacité connue C et qu'on opère la décharge lente à travers un corps de grande résistance R, par exemple à travers l'enveloppe de gutta-percha interposée entre le fil intérieur d'un câble sous-marin et l'eau extérieure, dont le potentiel est nul. Si le potentiel du conducteur chargé tombe de V à v dans le temps t, on a pour la résistance R en mégohms, C étant exprimé en microfarads,

$$(16) \qquad R = \frac{t}{C \log_\varepsilon \frac{V}{v}} = 0,4343 \frac{t}{C \log \frac{V}{v}};$$

La capacité d'un fil recouvert, dont on néglige les extrémités, est donnée en mesure électrostatique par la formule (6) (Chap. V). Pour convertir cette valeur en mesure électromagnétique, il faut la diviser par v^2 (Chap. VIII, n° 2); et pour exprimer le résultat en microfarads, il faut multiplier le quotient par 10^{15} (Chap. X, n° 5). Il suit de là que, en microfarads, la valeur de C pour un mille du câble atlantique anglais est

$$(17) \qquad C = \frac{4,2 \times 185531,76 \times 10^{15}}{4,6052 \times (28,8)^2 \times 10^{18} \times \log \frac{D}{d}} = \frac{0,2038}{\log \frac{D}{d}}.$$

En portant cette valeur de C dans l'équation (16), on trouve que la résistance de la matière isolante pour une longueur de 1 mille de câble ou, comme on dit, la résistance d'isolement de ce câble par mille est

$$(18) \qquad R_m = 2,13\, t \frac{\log \frac{D}{d}}{\log \frac{V}{v}}.$$

Cette formule est plus commode que la formule (14); car les quantités D, d, V et v n'y entrent que par leurs rapports et peuvent

par conséquent être mesurées en unités quelconques; de plus, $\log \frac{D}{d}$ est constant pour chaque câble. On peut observer les valeurs de V et v avec un électromètre, ou à l'aide de galvanomètres, en faisant usage de la méthode exposée dans le Chapitre relatif à la mesure de la capacité.

La résistance spécifique d'échantillons de fil très courts et isolés par diverses substances peut se calculer à l'aide de la méthode précédente, lorsque le courant qui traverse la matière isolante est trop faible pour agir même sur le galvanomètre le plus sensible.

Cette méthode n'est correcte que si R est constant pendant toute la durée de l'expérience; on sait que sous l'influence de la charge, la résistance de la matière isolante augmente effectivement de minute en minute, en sorte que le résultat donné par la formule est intermédiaire entre les deux valeurs de la résistance prises au début et à la fin de l'expérience.

19. Une élévation de température produit toujours une diminution de la résistance des corps isolants. Entre 0° et 24° C., la loi de la diminution de la résistance pour la gutta-percha est représentée approximativement par la formule empirique suivante :

Soient r la résistance spécifique de la matière isolante à la température la plus élevée, R sa résistance à la température la plus basse, et t la différence des deux températures en degrés centigrades; on a

$$R = ra^t,$$

ou bien

$$\log \frac{R}{r} = t \log a. \qquad (19)$$

Dans cette expression, a est un coefficient qui varie avec les divers échantillons de gutta-percha et aussi avec la durée de la charge. La valeur de $\log a$ augmente avec la durée du courant qui traverse la gutta-percha, et, toutes choses égales d'ailleurs, elle est d'autant plus grande que la température est plus basse.

La Table suivante donne les valeurs de $\log a$ pour diverses durées d'électrisation et pour deux intervalles de température de 0° à 12°

et de 12° à 24°; ces résultats sont tirés d'une série d'expériences faites sur 1 mille du câble atlantique français.

Durée de l'électrisation en minutes.	Valeur de $\log a$ entre 0° et 12°.	Valeur de $\log a$ entre 12° et 24°.
1	0,0562	0,0532
2	0,061	0,0544
5	0,0657	0,0554
10	0,0686	0,0560
15	0,0706	0,057
20	0,0725	0,0574
25	0,0729	0,0578
30	0,0736	0,058
60	0,0765	0,06
90 ou plus	0,0747	0,0618

La résistance R du câble français, à 0° et après une minute de charge, était égale à 7540 mégohms; pour avoir la résistance r à 10°, après la même durée d'électrisation, on pose $t = 10$ dans la formule (19), et l'on déduit

$$\log\frac{R}{r} = 10 \times 0,0562,$$

d'où

$$r = \frac{7540}{3,648} = 2070 \text{ mégohms.}$$

La Table qui suit indique les résistances à 0° et à 24° de la matière isolante du câble atlantique français par mille pour diverses durées d'électrisation.

Durée de l'électrisation en minutes.	Résistance à 0° en mégohms.	Résistance à 24° en mégohms.
1	7540	369
2	9650	401
5	12300	457
10	14400	477
20	17400	493
30	18900	499
60	21900	509
90	24000	512

On remarquera que la variation de résistance produite par la durée de l'électrisation est beaucoup plus grande aux basses températures, ou, pour énoncer le même résultat sous une autre forme,

que le changement de résistance correspondant à un changement de température est beaucoup plus grand après une longue électrisation qu'après une charge de courte durée. Dans la plupart des expériences, la durée de l'électrisation est d'une minute. On a rassemblé dans le tableau suivant une série de valeurs de $\frac{R}{r}$, tirées de diverses observations et comprises entre les températures de 0° et 24°.

Désignation du câble ou de la matière isolante.	Valeur de $\frac{R}{r}$.	Valeur de $\log a$.
Câble du golfe Persique	36,5	0,0651
Câbles pour lesquels l'épaisseur de la gutta-percha n'excède pas $2^{mm},8$	23,62	0,0572
Câble atlantique français	20,43	0,0545
Gutta-percha perfectionnée de Willoughby Smith	28,14	0,0604
Caoutchouc de Silvertown	17,84	
Caoutchouc Hooper	3,01	0,0199

Les expériences faites sur le caoutchouc de Silvertown semblent montrer que l'accroissement de résistance de cette matière ne suit pas la loi exprimée par l'équation (19). La résistance de la composition Hooper, suivant les expériences de M. Warden, peut être calculée par cette formule jusqu'à la température de 38°, 33 C.; la résistance est réduite à moitié par un nouvel accroissement de température de 18°, 33.

L'électrisation de la composition Hooper présente des particularités encore plus remarquables que celle de la gutta-percha; sur un échantillon de cette composition, la résistance apparente est devenue quatre fois plus grande après dix minutes de charge; à la suite d'une électrisation prolongée pendant vingt-quatre heures, la résistance était 23 fois plus grande qu'après une minute de charge. Si l'on désigne par R_1 la résistance au bout d'une minute et par R_t la résistance au bout de t minutes d'électrisation, le rapport $\frac{R_1}{R_t}$ est, d'après M. Warren, constant à toutes les températures.

20. La résistance spécifique des matières isolantes autres que le caoutchouc et la gutta-percha n'a guère été expérimentée; celle du verre varie énormément avec la nature et la provenance des échantillons. On peut trouver des bouteilles de Leyde qui ne perdent

pas plus de $\frac{1}{400}$ de leur charge par jour, et la plus grande partie de cette perte semble due à une conduction sur la surface plutôt qu'à une conduction ou pénétration à travers la masse du verre : l'électricité, comme on dit, *rampe* sur le verre. La résistance spécifique de certaines espèces de verre est donc à peu près infinie ; mais plusieurs échantillons et particulièrement ceux qui contiennent du plomb isolent à peine aussi bien que la gutta-percha. Le caoutchouc vulcanisé, la porcelaine et la paraffine sont de bons isolateurs ; mais aucune expérience n'a été faite, à ma connaissance, dans le but de déterminer leurs résistances spécifiques. La paraffine liquide et quelques huiles sont aussi de bons isolateurs.

21. Pour le graphite et le charbon de cornue, qui sont employés dans les piles comme conducteurs, la résistance spécifique rapportée à l'unité de volume est variable depuis 1450 fois environ jusqu'à 40000 fois celle du cuivre, ainsi que le montrent les expériences du Dr Matthiessen. Le tellure et le phosphore rouge ont des résistances spécifiques encore plus élevées. La Table suivante contient les résultats de Matthiessen exprimés au moyen des nouvelles unités.

Résistance spécifique de divers corps mauvais conducteurs calculée d'après les expériences de Matthiessen.

DÉSIGNATION DES CORPS.	RÉSISTANCE		TEMPÉRATURE en degrés centigr.
Graphite échantillon n° 1	2390	microhms	22
» » n° 2	3780	microhms	22
» » n° 3	41800	microhms	22
Charbon de cornue	4280	microhms	25
Charbon pour pile Bunsen	67200	microhms	26,2
Tellure	212500	microhms	19,6
Phosphore rouge	132	ohms	20

22. La résistance spécifique des liquides électrolytes n'est pas connue très exactement à cause de la difficulté qu'apporte dans les mesures le phénomène inévitable de la polarisation. Une élévation de température diminue toujours leur résistance. L'effet de la

température a été étudié par Becker (*Annales de Chimie et de Pharmacie*, 1850 et 1851), et par Beetz (*Annales de Poggendorff*, CXVII, 1862). Paalzow a essayé d'échapper à la difficulté produite par la polarisation en employant pour électrodes des plaques de zinc amalgamé qui plongeaient dans des vases poreux contenant une dissolution de sulfate de zinc (*Annales de Poggendorf*, CXXXVI, 1869). Kohlrausch (*Ann. de Poggendorf*, CXXXVIII, 1869) s'est servi des courants rapidement alternés d'une machine magnéto-électrique et d'électrodes à très large surface. Ewing et Mac Gregor (*Trans. R. S. E.*, 1873) ont eu recours à la méthode du pont; ils faisaient usage d'un galvanomètre à miroir et à battement amorti qui leur permettait d'observer la résistance avant que la polarisation ait eu le temps de devenir sensible.

La dissolution saturée n'est pas toujours celle qui a la plus grande conductibilité; c'est ce qui arrive pour le sulfate de zinc et pour le chlorure de sodium. L'acide sulfurique étendu d'eau a une résistance minimum lorsque la densité du mélange est de 1,25, ou, d'après d'autres expériences, lorsque la solution renferme 45gr,84 d'acide sulfurique pour 100 centimètres cubes d'eau.

Les Tables qui suivent indiquent la résistance de quelques-unes des dissolutions les plus employées dans les piles. Sous le nom de *résistance spécifique* il faut entendre la résistance, exprimée en ohms, d'un centimètre cube dont les faces opposées sont traversées par un courant.

Dissolution de sulfate de zinc (*à* 10° C.).

DENSITÉ.	RÉSISTANCE spécifique.	DENSITÉ.	RÉSISTANCE spécifique.	DENSITÉ.	RÉSISTANCE spécifique.	DENSITÉ.	RÉSISTANCE spécifique.
1,0140	182,9	1,1019	42,1	1,2709	28,5	1,3530	31,0
1,0187	140,5	1,1582	33,7	1,2891	28,3 (minim.)	1,4053	32,1
1,0278	111,1	1,1845	32,1	1,2895	28,5	1,4174	33,4
1,0540	63,8	1,2186	30,3	1,2987	28,7	1,4220 (dissolut. saturée.)	33,7
1,0760	50,8	1,2562	29,2	1,3288	29,2		

EWING et MAC GREGOR

On obtient la dissolution de conductibilité maximum en dissolvant 73,5 parties de sel dans 100 parties d'eau.

Dissolution de sulfate de cuivre (*à* 10° C.).

DENSITÉ.	RÉSISTANCE spécifique.	DENSITÉ.	RÉSISTANCE spécifique.	DENSITÉ.	RÉSISTANCE spécifique.
1,0167	164,4	1,0858	47,3	1,1679	31,7
1,0216	134,8	1,1174	38,1	1,1823	30,6
1,0318	98,7	1,1386	35,0	1,2051	29,3
1,0622	59,0	1,1432	34,1	(dissolution saturée.)	

EWING et MAC GREGOR.

Suivant ces observateurs, la résistance du mélange des deux dissolutions précédentes (sulfate de zinc et sulfate de cuivre) est toujours moindre que la moyenne des résistances des deux dissolutions, et dans beaucoup de cas elle est moindre que la plus petite de ces deux résistances.

Mélange d'acide sulfurique et d'eau.

DENSITÉ.	RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE A							
	0°	4°	8°	12°	16°	20°	24°	28°
1,10	1,37	1,17	1,04	0,925	0,845	0,786	0,737	0,709
1,20	1,33	1,11	0,926	0,792	0,666	0,567	0,486	0,411
1,25	1,31	1,09	0,896	0,743	0,624	0,509	0,434	0,358
1,30	1,36	1,13	0,94	0,79	0,662	0,561	0,472	0,394
1,40	1,69	1,47	1,30	1,16	1,05	0,964	0,896	0,839
1,50	2,74	2,41	2,13	1,89	1,72	1,61	1,52	1,43
1,60	4,82	4,16	3,62	3,11	2,75	2,46	2,21	2,02
1,70	9,41	7,67	6,25	5,12	4,23	3,57	3,07	2,71

BECKER

Mélange d'acide azotique et d'eau.

DENSITÉ.	RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE.							
	2°	4°	8°	12°	16°	20°	24°	28°
1,36	1,94	1,83	1,65	1,50	1,39	1,3	1,22	1,18

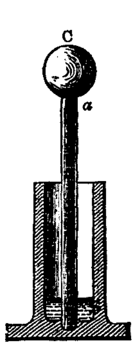
La résistance spécifique de l'eau pure, c'est-à-dire la résistance d'un centimètre cube d'eau pure est de 9320 ohms, d'après les expériences de Pouillet; la présence de $\frac{1}{20000}$ d'acide sulfurique réduit cette résistance à 1550 ohms. Pouillet n'a pas indiqué à quelle température se rapportent ces observations.

23. Quand on mesure la résistance des isolateurs, il faut avoir soin d'empêcher la conduction superficielle, c'est-à-dire le passage de la charge sur la surface de la matière isolante interposée entre les deux conducteurs ou armatures.

Prenons, par exemple, un conducteur C (*fig.* 136) soutenu sur une longue tige d'ébonite, et chargé d'électricité; si l'on observe, à l'aide d'un électromètre, la chute graduelle du potentiel de ce conducteur, on ne vérifie pas en réalité la résistance d'isolement de *ab*; car la perte d'électricité a lieu presque totalement par voie de conductibilité superficielle : l'électricité rampe de *a* en *b* sur la surface de l'isolant, légèrement humide ou recouverte de matières étrangères. De même la résistance d'isolement d'une petite longueur de fil recouvert (*fig.* 126) sera indiquée avec peu d'exactitude par le galvanomètre G, à moins que la gutta-percha, qui sépare de l'eau le fil conducteur, dans la portion de sa surface voisine de A, ne fasse obstacle à cette diffusion de l'électricité. Les surfaces des corps isolants n'ont pas un pouvoir conducteur spécial; mais par la mince couche d'humidité ou de matière étrangère qui les recouvre, l'électricité s'écoule en quantité proportionnelle à l'aire de la section transversale et au pouvoir conducteur de cette couche. Ainsi de la limaille de cuivre ou du sel ordinaire légèrement mouillés forment

une couche très conductrice. La surface du verre, corps très hygrométrique, est toujours recouverte d'une couche conductrice, à moins que l'atmosphère environnante ne soit desséchée artificiellement. Les couches extérieures de gutta-percha, aussitôt qu'elles se trouvent exposées à l'air, se modifient au point de ne plus isoler qu'imparfaitement; aussi, quand on se dispose à faire une expérience, il faut toujours rafraîchir les surfaces de la matière isolante en grattant avec un couteau la couche extérieure. Souvent il arrive que l'ébonite préparé depuis longtemps est recouvert d'une couche

Fig. 136.



conductrice provenant d'une altération superficielle de la matière. La surface du verre ancien qui a été exposé aux intempéries de l'air conduit mieux que le verre nouvellement fabriqué. M. Varley indique le procédé suivant pour maintenir ou restaurer le pouvoir isolant des supports en ébonite ou en caoutchouc vulcanisé. On lave d'abord le support avec de l'eau, puis on le frotte jusqu'à ce qu'il devienne sec; ensuite on mouille la surface avec de l'huile de paraffine déshydratée. Pour préparer cette huile, on mélange dans une bouteille 1^{lit} de paraffine ordinaire avec 30^{gr} de soude.

La meilleure manière de nettoyer un support en verre ou l'intérieur d'une bouteille de Leyde est de les laver avec de l'eau distillée et de les faire sécher au feu sans les essuyer. Préparée de cette façon, une tige en verre *ab* forme un isolant parfait, si on l'introduit dans un tube long et profond contenant un peu d'acide sulfurique concentré. Pour augmenter la résistance de la couche

superficielle conductrice, il faut diminuer la section de la tige et augmenter sa longueur autant que possible; ainsi une longue tige *ab* (*fig.* 136) isolera mieux qu'une tige courte, et une tige de petit diamètre mieux qu'une autre de large section.

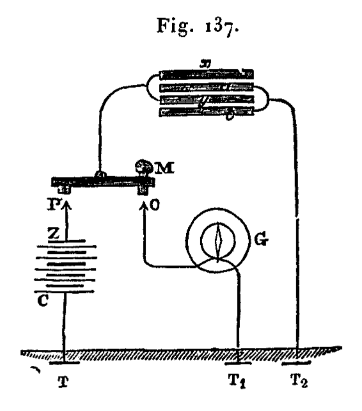
La résistance d'une couche d'impuretés à la surface des corps isolants ne paraît pas suivre la loi d'Ohm. Quand on augmente le potentiel du conducteur chargé et isolé, la perte par rampement s'accroît dans un rapport beaucoup plus grand que le potentiel; il est probable que le passage de l'électricité est en partie dû au nombre infini de petites décharges qui se produisent de proche en proche entre les petits grains de poussière ou d'impuretés.

CHAPITRE XVII.

COMPARAISON DES CAPACITÉS, POTENTIELS ET QUANTITÉS.

1. La mesure de l'angle d'impulsion qu'imprime à l'aiguille du galvanomètre la charge ou la décharge d'un condensateur permet de

Fig. 137.



comparer les capacités de plusieurs condensateurs quand elles sont suffisamment grandes. Soit x, y l'un des deux systèmes de plaques d'un condensateur; celles-ci sont séparées par un diélectrique des plaques opposées de l'autre système a, b. Les plaques a, b sont en communication avec la terre en T_2 et les plaques x, y avec le levier métallique du manipulateur M. Les contacts P et O de ce dernier servent à relier à volonté x, y au pôle zinc de la pile dont le pôle cuivre est à la terre, ou bien à l'une des bornes du galvanomètre G dont l'autre borne est également à la terre. Si la touche du manipulateur M est relevée, le condensateur x, y se charge d'électricité négative. Quand elle est abaissée sur le contact O, cette charge s'écoule vers la terre à travers le galvanomètre G; ce flux d'électricité communique à l'aiguille vers la droite ou vers la gauche une

impulsion de très courte durée. Soient C et C_1 les capacités de deux condensateurs qui, après avoir été chargés par la même pile, impriment à l'aiguille les déviations ω et ω_1; on a, si le mouvement de l'aiguille n'est gêné par aucun frottement,

$$\frac{C}{C_1} = \frac{\sin\frac{\omega}{2}}{\sin\frac{\omega_1}{2}}. \tag{1}$$

La charge totale écoulée est proportionnelle à la capacité du condensateur correspondant; l'impulsion ou la quantité de mouvement communiquée à l'aiguille est proportionnelle à cette charge; enfin le sinus du demi-angle de déviation est proportionnel à la quantité de mouvement; on en déduit par conséquent la relation précédente.

Au lieu d'observer la décharge, on aurait pu placer le galvanomètre G entre M et les plaques x, y du condensateur; dans ce cas, en élevant M, on aurait observé l'angle décrit par l'aiguille sous l'influence de la charge au lieu de l'angle décrit pendant la décharge du condensateur; ces deux angles sont égaux s'il n'y a pas de déperdition électrique entre les deux systèmes de plaques x, y et a, b. On pourrait substituer à la terre tout autre conducteur qui réunirait T, T_1 et T_2, sans modifier en rien le résultat de l'observation.

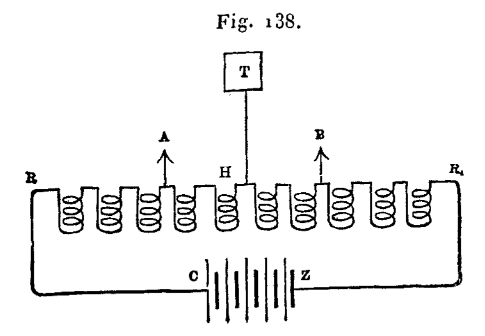
2. On peut expérimenter sur l'un des condensateurs avec un shunt inséré dans le galvanomètre, et sur l'autre condensateur avec un shunt différent ou sans shunt. Mais, dans ce cas, il faut prendre soin que le rapport de la résistance des shunts à celle du galvanomètre soit constant pour les courants instantanés comme pour les courants permanents. L'induction du courant sur lui-même peut être très différente dans le shunt et dans le galvanomètre, et la proportion suivant laquelle s'effectue le partage du courant entre le shunt et le galvanomètre se trouve alors notablement modifiée.

3. On peut aussi se servir du galvanomètre différentiel pour comparer deux condensateurs dont les capacités sont peu différentes. Les charges fournies aux deux condensateurs par la même pile doivent traverser simultanément les deux circuits galvanométriques,

et le sinus du demi-angle observé est proportionnel à la différence de capacité des deux condensateurs. Lorsqu'on fait cette expérience, il n'est pas nécessaire qu'il y ait coïncidence absolue entre les temps du passage des deux charges à travers les bobines; il suffit que l'écoulement simultané des charges s'effectue pendant que l'aiguille est encore sensiblement au repos.

Les capacités de deux condensateurs peuvent aussi se comparer au moyen d'un simple galvanomètre par la méthode suivante : On fait passer le courant d'une pile (*fig.* 138) à travers une résistance considérable RR_1, dont le milieu H est mis à la terre en T, le reste

Fig. 138.



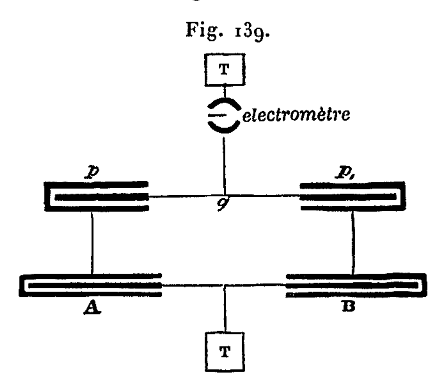
du système étant isolé. Lorsque les deux points A et B sont séparés de T par des résistances égales, ils ont des potentiels égaux et de signes contraires. Les deux condensateurs que l'on veut comparer sont ensuite chargés d'électricité par leur contact simultané avec A et B; si leurs capacités sont égales, ils recevront des charges égales et de signes contraires. Pour reconnaître si les deux charges sont égales, on sépare de A et B les condensateurs, et l'on met ensuite en communication les deux armatures électrisées, l'une positivement et l'autre négativement; les deux charges égales se neutraliseront exactement, et aucune charge libre n'apparaîtra sur l'un ou l'autre des condensateurs, ce dont on peut s'assurer soit à l'aide d'un électromètre, soit à l'aide d'un galvanomètre. Si les deux condensateurs ne sont pas d'égale capacité, on mesurera le rapport de leurs capacités en déterminant le rapport des résistances HA et HB nécessaires pour communiquer aux condensateurs des charges qui se neutralisent exactement. Les capacités sont en raison inverse des

résistances intercalées entre les points de contact et la terre. Les résistances HA et HB doivent être considérables; sinon les potentiels en A et B seraient trop faibles pour que la charge prise par les condensateurs puisse être mesurée à l'aide de l'électromètre ou du galvanomètre.

Les points de contact A et B des condensateurs peuvent être reliés par des pièces à curseur à l'une quelconque des bornes intermédiaires qui subdivisent la résistance totale RR_1.

4. Pour la mesure des petites capacités, on peut se servir du platymètre et du condensateur à glissement de sir W. Thomson

Fig. 139.



Soient p et p_1 deux condensateurs égaux (*fig.* 139), dont les armatures extérieures sont isolées et les armatures intérieures reliées entre elles et à un électromètre; et soient A et B les deux condensateurs que l'on se propose de comparer; on réunit respectivement les armatures extérieures de A et B avec celles de p et p_1, et on met leurs armatures intérieures en communication avec la terre. Le condensateur A est construit de telle sorte que sa capacité puisse être modifiée à volonté.

Chargeons l'armature extérieure de A positivement, et en même temps relions le point q à la terre; l'armature extérieure de p prendra une charge positive et son armature intérieure une charge négative; p_1 demeurera sans charge. Si l'on rompt la communication de q avec la terre, l'électromètre ne déviera pas; car la charge de p n'aura pas changé.

Relions ensemble les armatures extérieures de A et de B. Si le rapport de p à A est le même que celui de p_1 à B, le potentiel de q ne change pas et l'électromètre ne dévie pas; si $\frac{p}{A}$ est plus grand que $\frac{p_1}{B}$, le potentiel de q est abaissé; si $\frac{p}{A}$ est moindre que $\frac{p_1}{B}$, le potentiel de q est élevé par suite de la communication des armatures extérieures de A et de B. Les déviations de l'électromètre produites par l'accroissement ou la diminution du potentiel de q nous permettent de régler la capacité A de telle sorte qu'on ait l'égalité de rapports

$$\frac{p}{A} = \frac{p_1}{B}.$$

Si $p = p_1$, on a $A = B$; il suffit donc d'ajuster la capacité de A de manière qu'elle devienne égale à celle de B qui se trouve ainsi déterminée.

Ce procédé paraît être le meilleur qu'on puisse employer pour reproduire des condensateurs étalons; car l'exactitude du résultat est indépendante de la précision de tout autre instrument. La moindre erreur dans l'ajustement exact de p et de p_1 peut être mise en évidence en renversant la position relative de A et de B. D'ailleurs le rapport d'égalité entre les capacités p et p_1 n'est pas nécessaire; pour qu'il n'y ait en q aucune quantité d'électricité libre et par suite aucune déviation de l'aiguille de l'électromètre, il suffit que l'on ait

$$\frac{p}{A} = \frac{p_1}{B}.$$

L'analogie qui existe entre cette disposition et le pont de Wheatstone est évidente.

5. La capacité *absolue* d'un condensateur de faible surface peut être obtenue en mesure électrostatique par comparaison avec celle d'une sphère de rayon connu suspendue à l'intérieur d'une *autre* sphère de rayon connu.

La capacité absolue des condensateurs de plus grande surface, en mesure électromagnétique, se déduit de la déviation extrême

ou élongation ω de l'aiguille d'un galvanomètre à travers lequel on fait passer une décharge instantanée; on a

$$(2) \qquad C = 2\,\frac{T \sin \frac{1}{2}\omega}{\pi R_1}.$$

Dans cette expression, T représente la durée d'une oscillation complète de l'aiguille du galvanomètre quand aucun courant ne le traverse, et R_1 est la résistance du circuit à travers lequel la force électromotrice employée pour charger le condensateur produirait l'unité de déviation; ω a la même signification qu'au numéro 1. Dans un galvanomètre à miroir, on peut remplacer le sinus par l'arc.

La formule précédente est une conséquence de la formule qui exprime la quantité de mouvement communiquée par le courant à l'aiguille, et de la formule qui donne l'angle d'impulsion correspondant. Pour qu'elle soit applicable, il faut que l'impulsion soit de très courte durée par rapport au temps T, et que la résistance de l'air soit insensible. Cette dernière condition est seulement remplie lorsque les oscillations successives de l'aiguille sont sensiblement égales. Dans un essai de cette nature, on doit donc employer un galvanomètre à aiguille lourde (galvanomètre balistique). On peut déterminer par ce procédé la valeur absolue de la différence des capacités de deux condensateurs, ce qu'on avait appris à obtenir par la méthode indiquée au numéro 3.

6. On peut comparer indirectement les potentiels de deux piles en observant les courants d'intensité constante que ces deux piles sont capables de produire à travers des résistances connues. Mais cette méthode présente un inconvénient : la force électromotrice de la plupart des piles varie avec la résistance du circuit; elle est plus élevée avec une grande résistance dans le circuit et plus basse avec une faible résistance.

On peut comparer directement les potentiels en observant les déviations que les deux piles produisent sur le même électromètre. Si la différence de ces potentiels est grande, il faut recourir à un électromètre gradué ou bien employer la méthode qui suit : on charge un condensateur avec la pile dont le potentiel est le plus élevé; on l'isole et l'on diminue ensuite son potentiel dans un rapport

convenable et connu, en le mettant en communication avec un second condensateur dont la capacité a été préalablement comparée à celle du premier. Ainsi réduite, la valeur du potentiel est comprise dans les limites de l'échelle de l'électromètre qui sert à mesurer le potentiel le moins élevé. Si l'on dispose d'un condensateur de grande dimension, on peut se dispenser de l'électromètre et employer un galvanomètre pour déterminer les potentiels relatifs auxquels le condensateur est successivement chargé par les deux piles. Les deux décharges sont proportionnelles aux sinus des demi-angles d'impulsion, et comme la capacité du condensateur est constante, les potentiels auxquels le condensateur est chargé sont eux-mêmes proportionnels à ces sinus ou, dans le cas du galvanomètre à miroir, aux arcs décrits sur l'échelle par la tache lumineuse. A l'aide de shunts insérés sur le galvanomètre, cette méthode est susceptible d'une grande extension et permet de comparer des potentiels qui diffèrent dans le rapport de 1 à 100 ou de 1 à 1000.

7. Il est rare qu'une *quantité* d'électricité soit mesurée directement. Un courant d'intensité connue, qui s'écoule pendant un temps donné, transporte une quantité définie d'électricité ; un conducteur de capacité connue, chargé à un potentiel donné, contient aussi une quantité connue d'électricité. Les charges relatives par unité de surface d'un conducteur peuvent être mesurées à l'aide du plan d'épreuve et d'un électromètre, comme on l'a déjà expliqué. Dans un courant permanent, la quantité d'électricité transportée se détermine le plus commodément en évaluant la somme de chaleur développée ou l'intensité de l'action chimique produite, c'est-à-dire le poids de la substance électrolysée. Dans un courant de très courte durée, la quantité Q d'électricité qui circule à travers le fil d'un galvanomètre est fournie en mesure électromagnétique par la formule suivante :

$$Q = 2\,\frac{i_1 T}{\pi}\sin\tfrac{1}{2}\,\omega. \tag{3}$$

Dans cette expression, i_1 est l'intensité du courant permanent qui produit l'unité de déviation sur le galvanomètre. Cette équation dérive de l'équation (2).

CHAPITRE XVIII.

MACHINES ÉLECTRIQUES A FROTTEMENT.

1. La plus simple de ces machines est l'électrophore (*fig.* 140) qui se compose de deux parties :

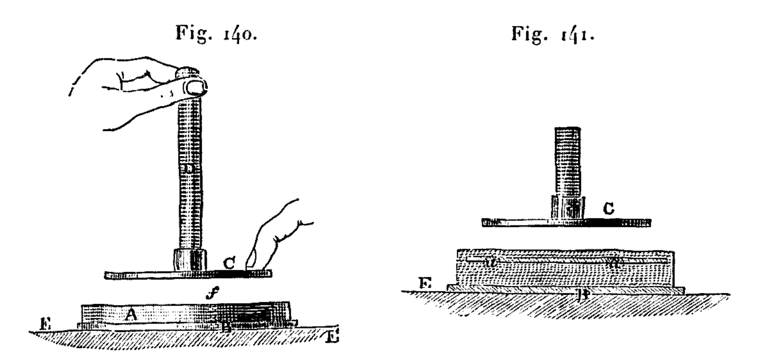
1° Un disque d'ébonite ou de toute autre matière isolante A, mastiqué dans un moule métallique B non isolé;

2° Un plateau métallique C qui peut être soulevé à l'aide d'un manche isolant D.

Lorsque la surface de l'ébonite A est frottée avec de la flanelle, de la soie ou une peau de chat, elle s'électrise négativement; si l'on place alors le plateau C sur l'ébonite électrisé et si on le met en communication avec la terre en le touchant avec le doigt, une partie de l'électricité négative développée sur A s'écoule dans le sol; mais une autre partie de cette électricité demeure sur A, et cela pour deux raisons : d'abord il n'y a pas de contact parfait établi entre A et C sur toute l'étendue de leurs surfaces; en second lieu, l'électricité développée sur A ne reste pas tout entière à la surface; mais, attirée par le fluide contraire induit sur la face interne du moule B, elle traverse la masse de l'ébonite suivant le mode d'électrisation décrit au Chapitre V (n° 6). L'électricité négative qui reste sur le gâteau d'ébonite et dans son intérieur attire une charge positive sur la face inférieure de C. Si maintenant on cesse de toucher le plateau C et qu'on le soulève ensuite, il conserve sa charge d'électricité positive, qui peut se perdre dans le sol sous la forme visible d'une étincelle, quand on approche des bords du plateau l'articulation du doigt ou tout autre conducteur à arête émoussée. Le plateau est déchargé; pour le charger de nouveau, il suffit de le poser comme précédemment sur le gâteau d'ébonite et de le toucher avec le doigt avant de le soulever; cette opération peut être indéfiniment répétée, jusqu'à ce que la charge primitive de A, ayant été communiquée graduellement aux conducteurs B et C, soit entièrement

épuisée. Il est certain que l'électricité, qui agit pour induire une charge sur C, ne réside pas à la surface de A ; car, en disposant une ou deux petites chevilles en laiton, qui relient la surface de A à celle de B, on améliore l'action de l'électrophore : ces chevilles métalliques servent à conduire dans le sol, par l'intermédiaire de B, toute charge négative qui peut s'accumuler sur la surface de A. L'électrophore agit donc comme s'il était formé de plusieurs parties disposées comme dans la *fig.* 141 ; au lieu d'un simple gâteau d'ébonite A, on a un disque métallique *a*, *a*, chargé d'électricité

Fig. 140. Fig. 141.



négative et séparé du plateau C par une faible épaisseur de diélectrique et du moule B par une plus forte épaisseur du même diélectrique.

Un électrophore est capable de fournir sans interruption des étincelles qui se succèdent avec rapidité et pendant un temps considérable ; il peut même servir à charger des bouteilles de Leyde. On fabrique un électrophore à bon marché en faisant usage de résine au lieu d'ébonite et de plateaux en bois recouverts d'une feuille d'étain au lieu de plateaux en laiton.

2. La machine électrique à frottement (*fig.* 142) consiste en un *plateau* ou un *cylindre d'ébonite* ou de verre A qu'on fait tourner entre des coussins ou frottoirs de soie ou de cuir BB_1. Par l'effet du frottement, les frottoirs de soie s'électrisent négativement et le plateau ou le cylindre de verre s'électrise positivement. La différence de potentiel qui s'établit dépend de la nature des corps qui

frottent l'un contre l'autre; si l'un d'eux est mis à la terre, le potentiel de l'autre prend une valeur positive ou négative deux fois plus grande que celle qu'il prendrait si les deux corps étaient isolés après avoir été mis au potentiel de la terre au début de l'expérience. Cet effet est absolument analogue à celui qui se présente avec un élément de pile; lorsque les deux pôles sont isolés, l'un

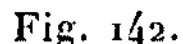
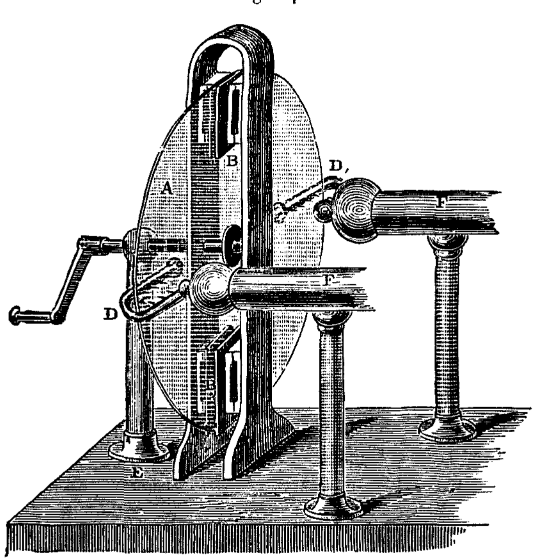


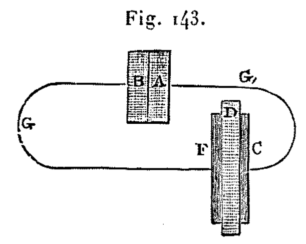
Fig. 142.



a un potentiel supérieur à celui de la terre, l'autre un potentiel inférieur. Si l'un des pôles est mis à la terre, le potentiel de l'autre prend immédiatement une valeur double; car la différence des potentiels doit rester ce qu'elle était précédemment. Supposons que les frottoirs d'une machine électrique soient mis à la terre; l'électricité positive du verre est alors recueillie par une série de pointes DD_1 disposées tout près du verre et reliées à un conducteur F ou à une bouteille de Leyde. On dit quelquefois que ces pointes agissent par induction de la manière suivante : l'électricité positive de A induit sur les pointes une charge négative, qui, s'élançant à travers l'air des pointes au plateau, neutralise l'électricité positive

du verre et laisse ainsi le conducteur ou la bouteille de Leyde chargée d'électricité positive. Au point de vue théorique et pratique, il n'y a aucune différence entre une étincelle négative passant de D à A et une étincelle positive passant de A à D; nous pouvons donc nous contenter de l'explication plus simple donnée précédemment. L'électricité positive que perd le verre est restituée par l'intermédiaire du frotteur; un flux d'électricité négative s'écoule du frotteur à la terre pendant que le conducteur ou la bouteille de Leyde se charge; ce qui revient à dire qu'un flux contraire d'électricité positive passe de la terre au frotteur, et de là se répand sur le verre et enfin sur le conducteur ou la bouteille de Leyde. Pour obtenir l'effet utile maximum d'une machine élec-

Fig. 143.



trique, employée à charger une bouteille de Leyde, il est indispensable de mettre en même temps à la terre et le frotteur de la machine et l'armature extérieure de la bouteille; cette précaution toutefois n'est pas nécessaire si l'on réunit le frotteur à l'armature. Pour communiquer à un conducteur ou à une bouteille le maximum de la charge que peut fournir la machine, il faut établir un circuit électrique complet, interrompu seulement par le diélectrique servant à isoler le conducteur que l'on veut charger. Il est indifférent que la terre fasse ou non partie du circuit. Les diverses parties de ce circuit doivent être disposées comme l'indique la *fig*. 143 : B représente le frotteur; A le verre frotté; GG_1 les fils ou les chaînes destinées à conduire l'électricité; F et C les deux armatures opposées de la bouteille de Leyde et D le diélectrique; C peut être une simple sphère en laiton, F les murs de la salle d'expérience et D l'atmosphère de cette salle. Ce cas ne diffère de celui d'une bouteille de Leyde ordinaire que sous le rapport de la capacité du conduc-

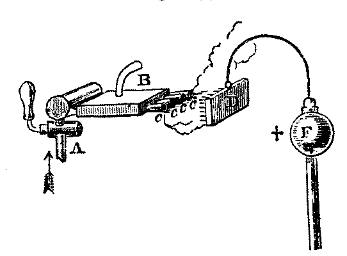
teur C. La machine [A,B] produira toujours la différence maximum de potentiel entre F et C; mais la charge accumulée sur C sera simplement proportionnelle à sa capacité. Le circuit peut être entièrement isolé; il peut être mis à la terre entre B et F ou bien entre A et C. Le seul effet de ces modifications sera de changer les potentiels absolus de F et de C, mais non de changer leur différence. Si G et G_1 étaient mis tous deux à la terre, le circuit serait détruit, et l'on ne pourrait observer aucun effet ni sur F ni sur C. Le circuit serait encore détruit s'il y avait rupture des fils de communication en G ou G_1; mais dans ce cas il se reforme en général un circuit moins parfait, qui conduit à l'observation d'une certaine différence d'état électrique entre F et C, sous la condition que l'un des deux fils G ou G_1 reste entier.

3. Dans les machines électriques fournies par les constructeurs, l'électricité est recueillie sur de longs cylindres métalliques, isolés à l'aide de hauts supports et terminés ordinairement par des peignes recourbés D, D_1. Ces conducteurs de grande dimension ont une capacité assez considérable et permettent à la machine de produire de longues étincelles et d'autres phénomènes qui exigent l'accumulation d'une très grande quantité d'électricité. Si l'on ajoute à l'appareil un long cylindre de carton, à bases arrondies, recouvert d'une feuille d'étain, isolé sur une haute tige et relié aux peignes D, D^1 par un fil à travers l'air, on augmente notablement le volume de l'étincelle que l'on peut tirer de la machine. Les supports qui isolent le mieux sont faits en caoutchouc durci (ébonite); il faut avoir soin de maintenir leur surface parfaitement nette (Ch. XVI, n° 23). Le système des conducteurs reliés à DD_1 ne doit présenter ni pointe ni arête vive, si l'on veut observer des phénomènes qui exigent de grandes différences de potentiel. Les tiges et plateaux en verre ne sont plus employés aujourd'hui; ils sont fragiles et très hygrométriques; quand on les frotte, pour les sécher, avec un morceau de drap qu'on a fait chauffer, ils se recouvrent de filaments qui conduisent l'électricité à la terre.

4. Le frottement des globules d'eau, en suspension dans la vapeur, contre le bois ou toute autre matière isolante est aussi une

source d'électricité que l'on peut utiliser. Armstrong, qui a découvert ce phénomène, a imaginé l'appareil suivant : La vapeur sort d'une chaudière à haute pression par le tuyau A (*fig.* 144) et traverse une série de tubes contenus dans une boîte B, remplie d'eau froide. Au sortir de ces tubes, la vapeur est chargée de globules d'eau condensée et s'échappe en jets par les orifices *ccc*. Ces orifices ou becs

Fig. 144.



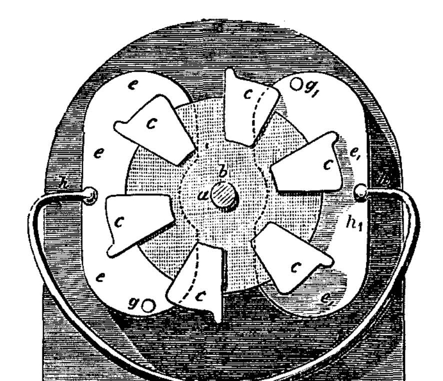
d'échappement sont revêtus de bois intérieurement. Par le frottement contre les becs, la vapeur se charge d'électricité positive, qui est recueillie sur un peigne métallique D en communication avec un conducteur isolé F. Les globules d'eau ne doivent contenir aucune substance étrangère ou du moins ne contenir que des substances isolantes. La résistance de l'eau pure est si grande qu'elle peut être considérée comme un isolateur imparfait, analogue à la flanelle. La matière contre laquelle l'eau frotte exerce, comme on pouvait le prévoir, une grande influence sur la quantité et sur la nature de l'électricité développée. Quand on mêle de la térébenthine à l'eau de la chaudière, la vapeur est électrisée négativement.

CHAPITRE XIX.

MACHINES D'INDUCTION ÉLECTROSTATIQUE.

1. L'action de l'électrophore que nous avons décrit au Chapitre XVIII (n° 1) peut être réalisée au moyen d'un assemblage de pièces où l'on évite toute production directe d'électricité par frot-

Fig. 145.



tement; et même on peut combiner ces appareils de façon que la charge inductrice soit augmentée sans cesse par le jeu de la machine : telles sont les machines d'induction imaginées par Bennett, Nicholson, Varley, Thomson, etc. Dans ces machines l'énergie mécanique est directement transformée en électricité accumulée à des potentiels différents : le travail mécanique est dépensé à vaincre

des résistances électrostatiques. Nous allons décrire le modèle de M. Varley.

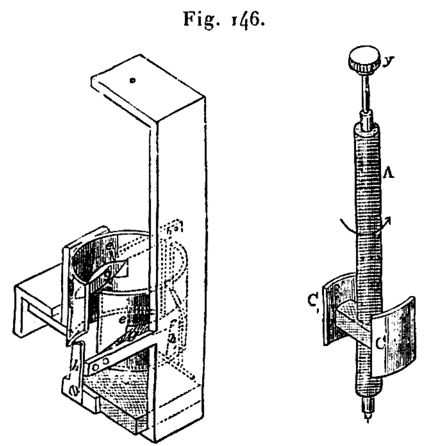
Une série de conducteurs métalliques c c c qu'on appelle des *porteurs* (*fig.* 145) sont fixés sur un plateau circulaire en ébonite, b, mobile autour d'un axe a, auquel on peut imprimer un mouvement de rotation aussi rapide qu'on le désire. Le plateau et les porteurs tournent entre deux paires de joues métalliques isolées e et e_1 qu'on appelle des *inducteurs*. Les boutons h et h_1 communiquent avec le sol et sont rencontrés par les porteurs c, c, c à chaque révolution. Enfin en g et g_1 se trouvent des goupilles de contact qui mettent successivement chaque porteur en communication avec e et avec e_1 pendant un instant, au moment de leur passage.

Supposons qu'une petite charge d'électricité positive soit donnée à e, le reste de l'appareil étant au potentiel de la terre. La plaque e induit une charge négative sur chaque porteur au moment où il dépasse h, tandis que l'électricité positive s'écoule dans le sol par l'intermédiaire de h. Le porteur transmet cette charge négative à g_1 qui l'abandonne presque totalement à l'enveloppe inductrice e_1. Cette nouvelle répartition de la charge laisse le porteur à peu près à l'état neutre; l'inducteur e_1 induit ensuite une charge positive sur le porteur aussitôt qu'il est descendu au-dessous de h_1; le porteur cède cette charge à e par l'intermédiaire de la goupille g, et augmente ainsi la charge positive primitivement communiquée à l'inducteur. Lorsqu'il passe de nouveau devant h, il reçoit par induction une charge négative plus grande qu'au premier tour, laquelle accroît encore la charge négative de e_1; celle-ci induit sur c une nouvelle charge positive qui est transportée sur e. Chaque révolution augmente ainsi la charge des deux inducteurs dans un rapport qui grandit continuellement; la seule limite à la charge que l'on peut ainsi accumuler sur les inducteurs est produite par la déperdition de l'électricité qui s'échappe de ces derniers sous forme d'étincelle ou d'aigrette. On peut tirer de e ou de e_1 une succession indéfinie d'étincelles. Il n'est pas indispensable que les boutons h et h_1 soient en communication avec le sol; il suffit qu'ils communiquent l'un avec l'autre. Dans ce cas, lorsqu'un porteur c passe sur h et que le porteur c_1 diamétralement opposé passe sur h_1, c et c_1 communiquent ensemble pendant un instant; une charge posi-

tive est induite sur c_1 et une charge négative sur c. Quand on adopte cette disposition, l'un des inducteurs peut être mis en communication avec la terre.

L'appareil imaginé par Thomson pour recharger la bouteille de Leyde de son électromètre (Chap. XIV, n° 2) et y maintenir un potentiel constant occupe très peu de place. Les inducteurs sont des plaques métalliques ee_1 recourbées de manière à former des surfaces cylindriques (*fig.* 146). Sur l'axe A sont fixés deux por-

Fig. 146.



teurs C, C_1 également formés par des portions de surfaces cylindriques, mais non concentriques avec celles des inducteurs. Sur la figure l'axe et les porteurs sont représentés à part; on les suppose enlevés de la place qu'ils occupent à l'intérieur des inducteurs. Les boutons de communication sont désignés par h et h_1. Les ressorts g et g_1 correspondent aux goupilles qui sont indiquees par la même lettre dans l'appareil de Varley. Le *moulinet* est un autre appareil dont se sert sir William Thomson pour obtenir une rapide succession d'étincelles; les inducteurs sont des portions de cylindre, et les porteurs de longues bandes semblables aux douves d'un tonneau. La plus faible charge que l'on puisse imaginer sur un des inducteurs de ces machines est une amorce suffisante pour les mettre en action. En réalité il est difficile, sinon impossible, que les inducteurs e et e_1 aient des potentiels assez voisins de l'égalité pour ne

pas acquérir une forte charge, après un petit nombre de tours des porteurs.

2. La machine électrique de Holtz est une machine d'induction où les porteurs sont remplacés par la couche imparfaitement conductrice qui recouvre habituellement un plateau de verre ou par la

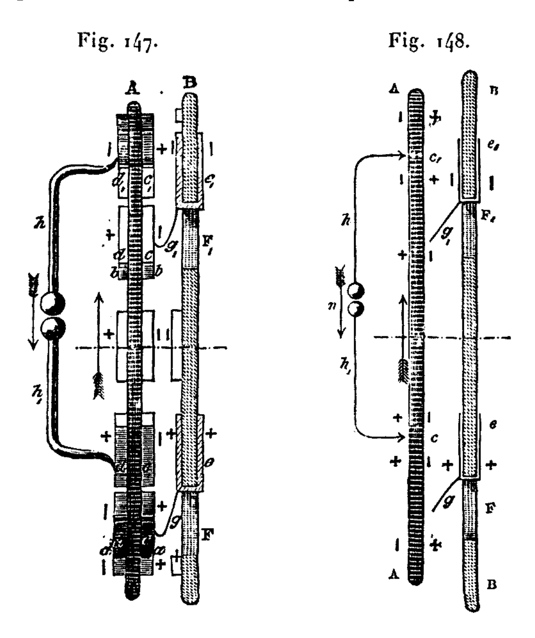


Fig. 147. Fig. 148.

couche extérieure du verre lui-même considéré comme un corps capable de recevoir une charge mais non de conduire l'électricité. Cette couche doit être suffisamment isolante pour maintenir adhérente et fixe la charge qu'elle a prise. On comprendra plus aisément la théorie de cette machine si l'on imagine à la place de la couche précédente une série de porteurs isolés et semblables à ceux de l'appareil de Varley.

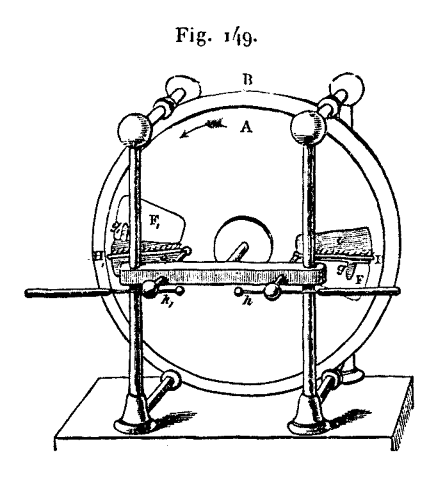
Soient (*fig.* 147) un plateau fixe de matière isolante B et un autre plateau de matière isolante A, mobile autour d'un axe. Sur chaque face du plateau A se trouve une série de porteurs métalliques, c et d, tous isolés l'un de l'autre. Au plateau B sont adaptés

deux inducteurs e et e_1 électrisés le premier positivement et le second négativement; e et e_1 recouvrent les deux faces du plateau B sur une petite étendue ; il y a en outre deux ouvertures représentées dans la figure en F et F_1. Les tiges fixes h et h_1 servent à relier deux à deux les porteurs, tels que d et d_1, qui se présentent successivement par couples en face des inducteurs e et e_1, pendant la révolution du plateau A. Ces tiges sont pourvues de deux petites boules que l'on peut séparer pour montrer les étincelles qui s'échangent entre les conducteurs h et h_1. On voit encore sur la figure deux ressorts g et g_1 qui servent à mettre les porteurs en communication tour à tour avec e et e_1. Supposons que le plateau A tourne de façon que le bord le plus rapproché du lecteur se meuve de bas en haut dans le sens de la flèche. Lorsque c est en face de e et c_1 en face de e_1, d et d_1 étant réunis par les tiges h et h_1, une charge positive est induite sur les surfaces extérieures de d et c_1 et une charge négative sur les surfaces extérieures de d_1 et c. Le mouvement de rotation continuant, chacun de ces porteurs cesse de se trouver en communication avec h et h_1 et emporte avec lui sa charge d'électricité sans qu'il se produise un changement notable dans la distribution de cette charge. Au bout d'une certaine fraction de tour, d_1 et c_1 arrivent en face de F ; ils sont figurés dans cette position par d_a et c_a. Le porteur c_a chargé positivement se trouve en contact avec le ressort g; au même moment c et d occupent les positions c_b et d_b, et le porteur c_b chargé négativement arrive en contact avec le ressort g_1. Il y a alors une distribution nouvelle d'électricité. La capacité de c_a et c_b est diminuée par le vide du plateau B en F et F_1 ; la distribution nouvelle a pour résultat de faire passer la plus grande partie de l'électricité positive de c_a sur e et la plus grande partie de l'électricité négative de c_b sur e_1, et enfin de rendre libre une charge négative sur d_a et une charge positive sur d_b. Donc, lorsque d_a vient rencontrer h, dans la position occupée par d, il y a un flux d'électricité négative de d vers d_1, ou, si l'on veut, un flux d'électricité positive de d_1 vers d, et la succession des mêmes effets recommence. Les tiges h et h_1, les porteurs c, $c_1, \ldots$, les inducteurs e et e_1 et les ressorts des contact g et g_1 jouent exactement le même rôle dans la machine de Holtz et dans celle de Varley, mais avec cette différence que dans l'appareil de Holtz

les tiges de communication h et h_1, au lieu de relier directement une série de porteurs $c, c_1, \ldots$, relient une seconde série de porteurs $d, d_1, \ldots$, sur lesquels des charges sont induites par $c, c_1, \ldots$.

En réalité la machine de Holtz n'a pas de porteur; elle se compose d'un plateau fixe de verre B et d'un plateau mobile A également en verre; sur les ouvertures F et F_1 sont fixés des inducteurs en papier e et e_1; les ressorts de contact g et g_1 sont aussi remplacés par des bandes de papier taillées en pointes qui se dirigent vers les régions

Fig. 149.



du plateau A où devraient être les porteurs; chacune des tiges de laiton h, h_1 se termine en une série de pointes opposées à c et c_1; la fonction des porteurs est remplie par la surface du verre; l'action du verre est identiquement la même que celle qu'on vient d'indiquer pour les porteurs. Les ouvertures en F et F_1 ont pour but d'isoler sur le plateau B les parties positives des parties négatives, et aussi de changer la capacité de chaque portion de la surface de A qui passe devant ces ouvertures. Les tiges h et h_1 sont disposées de façon qu'elles puissent être écartées ou rapprochées pour ménager en n l'intervalle que franchissent les étincelles. Si cet intervalle est augmenté progressivement après que la machine a été mise en action sous l'influence d'une charge donnée à e ou e_1, on voit se produire en n une magnifique aigrette violette de plusieurs centimètres de

longueur. Lorsqu'on suspend des bouteilles de Leyde aux tiges h et h_1 pour en augmenter la capacité, cette aigrette est remplacée par un torrent continu de brillantes étincelles, et si ces bouteilles sont de grande dimension, on peut obtenir une série d'étincelles d'une longueur et d'un volume extraordinaires qui éclatent d'une

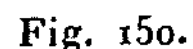
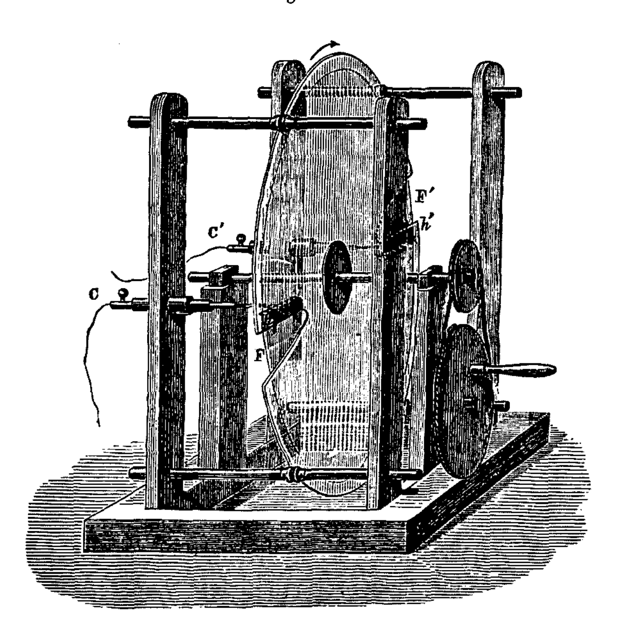


Fig. 150.



manière discontinue à des intervalles de temps d'une ou deux secondes.

Sur les *fig.* 147 et 148, auxquelles ces explications se rapportent, les ouvertures F et F_1 ont été représentées à une petite distance l'une de l'autre, parce que l'esprit peut alors embrasser plus complètement dans son ensemble la succession des faits d'induction qui se produisent. Mais dans la machine même que représente la *fig.* 149, ces ouvertures sont diamétralement opposées; l'électricité est soutirée du verre par un peigne, c'est-à-dire une série de pointes H et H_1

fixées aux tiges h et h_1. Les ouvertures F et F_1 sont derrière le plateau transparent A, bien qu'elles soient figurées en traits pleins. Les parties ombrées e et e_1 représentent les armatures de papier qui sont disposées sur les deux faces de B. L'appareil qui sert à mettre le plateau A en mouvement n'a pas été indiqué. Le plateau B s'appuie par ses bords sur quatre supports qui le maintiennent fixe.

Pour donner une idée plus complète de cet appareil, nous le représentons ci-dessus en perspective (*fig.* 150). Les ouvertures sont en F et F' et les peignes en h et h'; les fils conducteurs sont attachés aux bornes C et C'.

CHAPITRE XX.

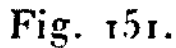
APPAREILS MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES.

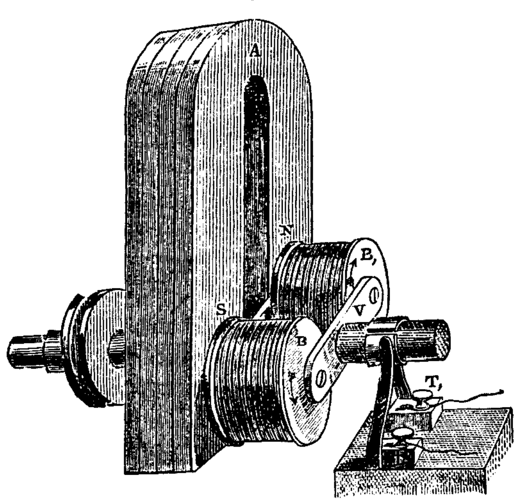
1. Le phénomène décrit au Chapitre III (n°s 18 et 19) et expliqué plus complètement au Chapitre IX est souvent désigné sous le nom d'*induction magnéto-électrique*, quand le courant induit est engendré par le mouvement d'un fil dans un champ magnétique produit par un aimant; on réserve le nom d'*induction électromagnétique* au phénomène d'induction magnétique produit par un courant électrique. La distinction établie à ce point de vue, bien que généralement adoptée [1], n'a aucun caractère scientifique. Toutefois il convient de conserver le nom d'*appareils magnéto-électriques* aux appareils dans lesquels des courants électriques d'une grande intensité sont induits dans des fils qui se déplacent à travers un champ magnétique créé par des aimants permanents ou des électro-aimants. Dans ces appareils, les bobines de fil sont mises en mouvement au moyen d'une force mécanique extérieure et indépendante, de nature quelconque.

On donnera, au contraire, le nom d'*appareils électromagnétiques* à ceux dans lesquels la pile qui engendre le courant est la source de puissance mécanique qui produit le mouvement. Une machine électromagnétique peut servir à mettre en mouvement d'autres mécanismes.

[1] On pourrait établir entre les deux sortes d'induction une distinction scientifique, c'est-à-dire reposant sur l'origine et la nature même des phénomènes; on attribuerait le nom d'*induction magnéto-électrique* à ceux dont la production nécessite un mouvement relatif, et on réserverait le nom d'*induction électromagnétique* aux seuls phénomènes qui résultent des variations d'intensité de courant ou d'aimantation, sans qu'il y ait mouvement relatif.

2. Pixii et Ritchie ont imaginé les premières machines dans lesquelles on produit des courants électriques par le déplacement relatif d'aimants et de bobines. L'appareil que nous allons décrire est généralement connu sous le nom de *machine de Clarke*. En avant d'un fort aimant en fer à cheval A (*fig.* 151) se trouvent deux bobines de fil isolé B et B_1 ; ces deux bobines sont soutenues par une monture en fer V, qui tourne autour d'un arbre horizontal entraîné lui-même par la rotation d'une poulie. Les fils de ces bobines sont reliés entre eux, de manière qu'un courant unique peut les traverser toutes deux : d'ailleurs ils sont enroulés sur leurs bobines respectives, de telle sorte


Fig. 151.



que le courant circule dans l'une de droite à gauche, et dans l'autre de gauche à droite. Chaque bobine contient un noyau de fer doux et ces deux noyaux sont reliés par la traverse de fer V à la partie dorsale B et B_1 de l'électro-aimant, c'est-à-dire à l'extrémité la plus éloignée de l'aimant fixe. Les deux bouts de fil, réunis ensemble, du côté de B et B_1, sont soudés au cylindre ou arbre métallique fixé au milieu de la bande de fer V ; les deux autres bouts sont réunis à deux bornes fixes T et T_1 par l'intermédiaire de ressorts, qui frottent contre des anneaux métalliques ou diverses pièces de contact

convenablement disposés sur l'axe. De cette façon, les extrémités du circuit induit sont en T et T_1 ; on le fermera donc en réunissant métalliquement T et T_1. Admettons qu'il en soit ainsi.

Pendant la rotation des bobines, chacun des noyaux de fer doux reçoit successivement deux aimantations de sens contraires. Par exemple, lorsque la bobine B se trouve en face du pôle nord de l'aimant fixe, son noyau s'aimante et acquiert un pôle sud à l'extrémité la plus voisine de l'aimant et un pôle nord à l'extrémité opposée. Cette distribution du magnétisme est renversée lorsque B arrive en face du pôle sud de l'aimant fixe. Ainsi, dans le cours de chaque révolution, les choses se passent comme si un aimant était d'abord introduit dans la bobine B, retiré de cette bobine à la fin du premier quart de révolution, introduit de nouveau avec ses pôles orientés en sens contraires, et de nouveau retiré après trois quarts de révolution, et ainsi de suite.

Or, lorsqu'on retire de la bobine un aimant permanent ayant son pôle nord à l'extrémité B, par exemple, ou qu'on y introduit un aimant ayant son pôle sud à la même extrémité, on exécute deux mouvements qui tendent l'un et l'autre à induire un courant de même sens. D'autre part, quand on vient à retirer cet aimant et quand on l'introduit ensuite dans la bobine avec les pôles intervertis, on exécute deux autres mouvements qui déterminent un courant induit de sens contraire au précédent. Ainsi, depuis le moment où la bobine B commence à s'éloigner du pôle S jusqu'au moment où elle arrive en face du pôle N, un courant induit unique et de même direction prend naissance dans le circuit ; mais aussitôt que B commence à s'éloigner de N pour se rapprocher de S, le sens du courant est renversé et demeure renversé jusqu'à ce que B revienne en face de S. Deux courants d'égale intensité et de sens contraires sont donc induits dans la bobine B pendant la durée de chaque révolution. Les mêmes raisonnements s'appliquent à la bobine B_1. Mais lorsque le courant induit dans la bobine B est dirigé de droite à gauche, celui qui circule dans la bobine B_1 est dirigé de gauche à droite. Comme l'enroulement du fil est effectué en sens contraire sur les deux bobines, les deux courants produits à chaque demi-révolution se superposent et s'ajoutent. Ces courants peuvent être recueillis et utilisés dans la portion du circuit comprise entre

les bornes T et T_1. Si les communications étaient établies aussi simplement qu'on l'a supposé jusqu'à présent, les courants seraient renversés entre T et T_1 à chaque demi-révolution; mais il est facile de disposer sur l'axe un système de contacts tels que les courants circulent toujours dans le même sens entre T et T_1, bien qu'ils soient nécessairement renversés sur les bobines.

3. Les courants ainsi obtenus, tout en circulant dans le même sens entre T et T_1, doivent passer dans le cours de chaque demi-révolution par un maximum et un minimum d'intensité.

L'intensité maximum a lieu aux points où l'armature, c'est-à-dire le noyau de fer doux de la bobine, oppose au mouvement de rotation la plus forte résistance; c'est aussi en ces points que la variation maximum se produit dans le magnétisme de l'armature. Le mouvement des bobines, sans noyau de fer doux, donnerait naissance à des courants semblables mais d'intensité beaucoup plus faible. La longueur et le diamètre qu'il convient d'adopter de préférence pour le fil des bobines dépendent de la résistance à travers laquelle les courants doivent passer entre T et T_1. Si cette résistance est petite, les bobines B et B_1 doivent être faites de gros fil; si la résistance extérieure est considérable, il faut composer les bobines d'un grand nombre de tours de fil fin.

4. Au lieu d'une seule paire de bobines et d'un seul aimant en fer à cheval, on peut disposer circulairement un nombre quelconque de bobines qu'on fait tourner comme un anneau en avant des pôles d'une série d'aimants disposés aussi en cercle et en nombre égal. Mieux encore, on peut faire tourner l'anneau de bobines entre deux rangées circulaires d'aimants assemblés et groupés de telle sorte que le noyau de fer doux dans chaque bobine se trouve alternativement aimanté dans deux sens opposés. Si l'on réunit alors chaque bobine à sa voisine de manière que le courant développé circule alternativement de gauche à droite et de droite à gauche dans les bobines successives, les forces électromotrices de toutes les bobines agissent dans le même sens et s'ajoutent dans l'intervalle de temps qui sépare les passages devant deux aimants consécutifs.

Les bobines peuvent être associées en série ou réunies en arc mul-

tiple; le premier mode d'association doit être adopté si l'on veut produire une force électromotrice élevée entre T et T_1, et le second mode si l'on a pour but d'obtenir une force électromotrice de valeur moyenne, et de conserver en même temps une résistance très faible dans la partie du circuit représentée par l'anneau des bobines tournant dans le champ de la machine magnéto-électrique. Avec cette dernière disposition des bobines se produisent des actions calorifiques intenses. Avec la première (bobines associées en série), un isolement des plus parfaits est nécessaire entre les couches successives du fil enroulé sur une même bobine; sinon des étincelles éclatant entre ces couches perforent la matière isolante, et la bobine ainsi avariée n'a plus d'effet. Nous allons décrire une machine de ce genre que M. Holmes a construite et dont il s'est servi avec succès pour produire le courant destiné au fonctionnement d'une lampe électrique de grande dimension.

Les bobines au nombre de 88 sont fixées sur le contour d'une roue d'environ $1^m,50$ de diamètre : leurs axes sont tous alignés parallèlement à l'axe de la roue. Elles sont distribuées sur deux disques contenant chacun 44 bobines également espacées. Le centre de chacune des bobines d'un disque correspond au milieu de l'intervalle qui sépare deux bobines consécutives de l'autre disque. La roue fait environ 110 tours par minute. Des aimants en fer à cheval, montés sur un bâti, sont disposés circulairement autour de la roue sur trois rangées parallèles, entre lesquelles tournent les disques; chaque rangée compte 22 aimants présentant 44 pôles régulièrement espacés. Les pôles de tous les aimants d'une même rangée sont situés dans un même plan. La distance qui sépare les deux pôles de chaque aimant est égale à la distance qui sépare deux bobines consécutives. Les aimants qui appartiennent aux deux rangées extérieures ont leurs pôles de même nom en face l'un de l'autre. Les aimants qui forment la rangée intérieure ont leurs pôles placés en face de deux pôles contraires appartenant aux rangées extérieures. Les aimants des deux rangées extérieures sont composés de 4 lames d'acier trempé; ceux de la rangée intérieure de 6 lames. Le poids de chaque lame est de $2^{kg},724$. Les noyaux de deux bobines consécutives sont aimantés en sens contraire, mais les fils de ces bobines sont réunis en série, de sorte que les courants induits circulent tous dans le

même sens sur les deux hélices. Le noyau en fer doux placé à l'intérieur de chaque bobine est creux; sa longueur est de $0^m,09$, son diamètre extérieur de $0^m,038$ et son diamètre intérieur de $0^m,025$. On enroule autour de chaque noyau deux fils de cuivre réunis en arc double de $13^m,70$ de longueur et de $3^{mm},75$ de diamètre; ces deux fils équivalent à un fil unique de même longueur et de $5^{mm},18$ de diamètre. Le noyau de fer et le fourreau de laiton qui l'enveloppe sont fendus longitudinalement, c'est-à-dire qu'une ouverture étroite est ménagée dans chaque cylindre parallèlement aux génératrices. Cette disposition empêche la formation de courants induits sur l'enveloppe de laiton et le fil de l'hélice, quand ces courants ne sont pas nécessaires.

Chaque rangée d'aimants induit 44 courants distincts pendant chaque révolution de la roue; l'intensité maximum du courant produit dans les bobines d'un disque coïncide avec l'intensité minimum du courant produit dans les bobines de l'autre disque; comme chaque courant dure un intervalle de temps très sensible et est toujours redressé, c'est-à-dire transmis dans la même direction au moyen d'un commutateur, la superposition de ces courants n'engendre pas une série d'étincelles, mais un flux uniforme d'électricité, c'est-à-dire un courant d'intensité constante ou à peu près constante. Une force de 1,25 cheval-vapeur est nécessaire pour entretenir le mouvement de la machine en activité; mais il suffit d'une force beaucoup moindre lorsque le circuit est rompu et que les courants induits ne peuvent plus circuler. Cette machine offre un exemple remarquable de la transformation du travail mécanique en électricité sous forme de courant.

5. Si le changement d'aimantation pouvait s'effectuer instantanément, il n'y aurait pas de limite à la force électromotrice que ces machines seraient capables de produire, ou du moins on ne serait arrêté que par la difficulté qu'on éprouverait pour isoler suffisamment le fil et pour mettre les bobines en mouvement à l'encontre d'une résistance devenue considérable; la force électromotrice développée dans les bobines par l'induction croîtrait proportionnellement à la vitesse de rotation. En réalité, à cause de la force coercitive qui existe dans le fer même le plus doux, et de l'induction

des spires de fil sur elles-mêmes, le changement d'aimantation et par suite de direction du courant demande un temps sensible; si la vitesse de rotation devient trop grande, eu égard au temps nécessaire pour que le changement d'aimantation se produise, la force électromotrice baisse au lieu de s'élever. On diminue l'effet de la force coërcitive en prenant, comme on l'a dit plus haut, un noyau de fer évidé, et l'on atténue les effets inutiles d'induction en fendant ce cylindre creux d'un bout à l'autre.

6. Évidemment les aimants employés pour induire des courants peuvent être remplacés par des électro-aimants; mais si ces derniers sont animés par une pile spéciale, le courant induit ainsi obtenu revient à un prix beaucoup plus élevé que le courant de même intensité engendré directement par la pile.

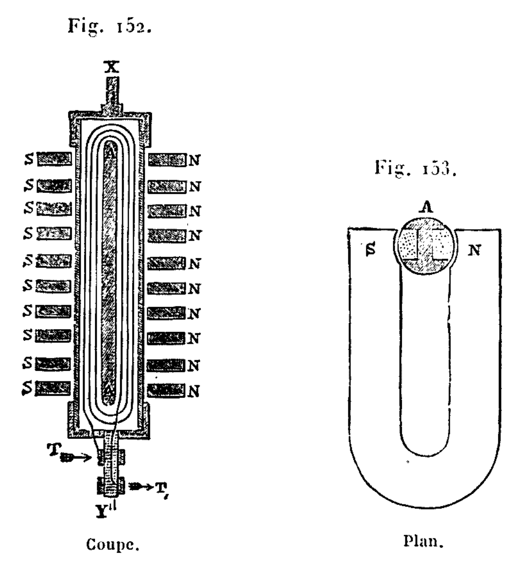
M. Wilde a conçu l'heureuse idée d'employer un premier courant induit par des aimants permanents, pour animer un gros électro-aimant qui sert à développer un second courant induit. Ce dernier acquiert une intensité beaucoup plus grande que celle du premier courant, si l'électro-aimant est plus puissant que l'aimant permanent. On peut utiliser ce second courant induit pour exciter un second électro-aimant plus puissant que le premier, et se servir ensuite de ce second électro-aimant pour induire un troisième courant plus intense que les deux premiers. Le docteur Siemens et le professeur Wheatstone ont imaginé presque simultanément un appareil fondé sur ce principe; ils se servent du courant induit par l'aimant permanent pour transformer cet aimant lui-même en électro-aimant. L'effet est très remarquable. Si faible que soit au début de l'expérience l'aimantation permanente de l'aimant inducteur, quelques tours des bobines et de leurs armatures, rapidement effectués, suffisent pour induire un courant qui croît en intensité suivant une progression géométrique, en même temps qu'il fait croître l'aimantation de l'électro-aimant inducteur, jusqu'à ce que la résistance opposée à la rotation des armatures, lorsqu'elles passent devant les pôles, devienne assez grande pour équilibrer la puissance motrice de l'appareil. Le courant tout entier du circuit principal peut être utilisé directement, ou bien on peut en dériver une partie pour l'utiliser à l'extérieur tandis que l'autre branche sert à entretenir le

magnétisme de l'électro-aimant. M. Ladd a modifié cette disposition : il monte sur la même armature deux bobines distinctes, l'une pour exciter l'électro-aimant, l'autre pour transporter le courant induit qui doit être utilisé en dehors de l'appareil. Les machines de Ladd, de Wilde et de Siemens produisent des courants capables de fondre une tige de fer de $0^m,025$ de diamètre et de $0^m,30$ de longueur. Les armatures et les bobines deviennent elles-mêmes si chaudes qu'il faut les refroidir artificiellement ; si l'on ne prenait cette précaution, la machine ne pourrait travailler que pendant des périodes de temps très courtes : elle serait vite endommagée et hors de service.

7. L'armature employée dans ces nouvelles machines a généralement la forme imaginée par MM. Siemens, laquelle est bien préfé-

Fig. 152.

Fig. 153.



Coupe.

Plan.

rable à celle de l'appareil Clarke. Les aimants en fer à cheval, composés de plusieurs lames d'acier, sont assemblés en une colonne d'une hauteur considérable ; ces aimants sont séparés les uns des autres par un intervalle assez grand, comme l'indique la *fig.* 152. L'armature AA_1 tourne autour de l'axe XY, entre les pôles de ce puissant aimant, et dans une partie du champ magnétique où l'in-

tensité est beaucoup plus grande que dans la région occupée par les bobines de Clarke. Cette armature consiste en un long barreau de fer doux, creusé de deux gorges longitudinales, et sa section présente la forme d'un double T comme on le voit en A (*fig.* 153). Elle est aimantée transversalement. Le fil est enroulé dans les gorges qu'il remplit de manière à rétablir la forme cylindrique.

Lorsque cette armature tourne autour de l'axe XY, son aimantation est périodiquement renversée et chaque renversement détermine la production d'un courant induit dans la bobine enveloppante. A cause de l'intensité et de l'uniformité du champ magnétique dans la région où le fil se déplace, cet appareil produit des effets bien supérieurs à ceux de l'appareil de Clarke.

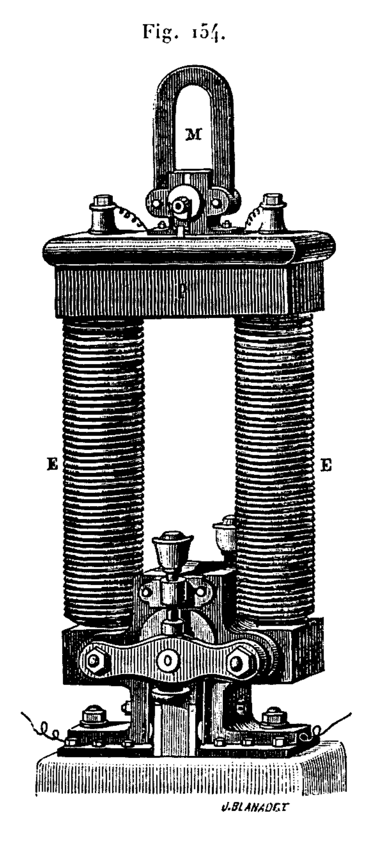
8. Il n'est pas nécessaire que l'armature de la machine de Siemens ou de Clarke ou celle d'une machine magnéto-électrique quelconque accomplisse une ou plusieurs révolutions pour induire un courant dans la bobine; le plus faible déplacement de l'armature autour de l'axe suffit pour développer une force électromotrice, car ce mouvement modifie l'intensité du champ dans lequel est placée l'armature. Avec l'armature de Siemens en particulier, la plus légère déviation, à droite ou à gauche de la position indiquée sur la *fig.* 152, engendre aussitôt un courant énergique. Les fils de la bobine se meuvent presque perpendiculairement à la direction des lignes de force du champ magnétique, et l'armature prend une aimantation telle qu'elle favorise les effets d'induction dus au déplacement de la bobine. La plus faible rotation dans un sens détermine un courant positif; dans le sens opposé elle détermine un courant négatif. On a construit sur ce principe des manipulateurs destinés à envoyer des signaux électriques sans le secours d'aucune pile.

La *fig.* 154 représente la machine de Wilde. La petite machine supérieure M est la machine excitatrice, dont les courants sont envoyés dans le grand électro-aimant EE; la plaque de fer P qui supporte l'excitatrice forme la culasse de cet électro-aimant.

9. La machine de Ruhmkorff se compose d'un électro-aimant excité par une bobine formée d'un fil gros et relativement court et appelée *bobine primaire;* un long fil fin, servant à former la

bobine secondaire, est enroulé autour du même électro-aimant. Le circuit primaire, dans lequel se trouve une pile de faible résistance, par exemple une pile Grove, est alternativement fermé et ouvert avec une grande rapidité; le circuit secondaire est toujours fermé,

Fig. 154.



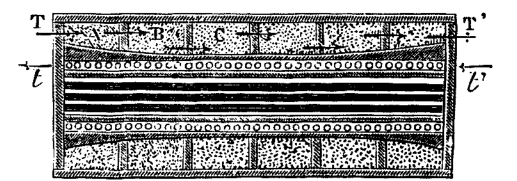
ou du moins il n'est interrompu que par une épaisseur d'air suffisante pour qu'une étincelle puisse franchir l'intervalle sous l'influence de la force électromotrice induite dans ce circuit. Quand on ferme le circuit de la bobine primaire, l'aimantation développée dans son noyau de fer doux induit dans le fil secondaire un courant de sens contraire à celui qui traverse le circuit primaire. Quand

on ouvre le circuit primaire, la diminution du magnétisme dans le noyau induit dans la bobine secondaire un courant de même sens que le courant primaire et par conséquent de sens contraire au courant précédemment induit.

La force électromotrice induite sur chaque spire de la bobine secondaire dépend de l'intensité du champ magnétique produit et de la rapidité avec laquelle ce champ naît ou disparaît. La somme des forces électromotrices ainsi développées dans une bobine formée d'un long fil est beaucoup plus grande que la force électromotrice de la pile employée; plus le circuit secondaire est long, plus la force qu'on obtient est considérable.

10. Le circuit secondaire d'une bobine de grandes dimensions donne des étincelles de plusieurs centimètres de longueur; mais les plus minutieuses précautions sont nécessaires pour l'isolement du

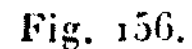
Fig. 155.

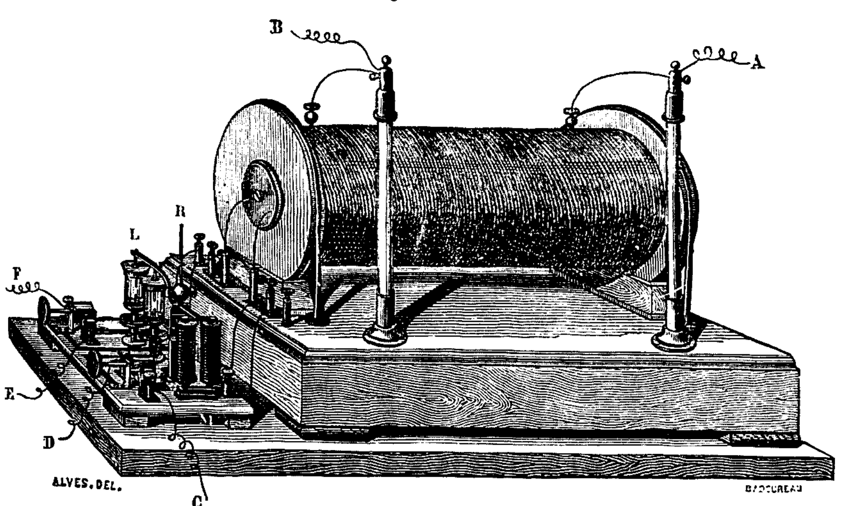


circuit secondaire de cet appareil. Chaque spire de fil doit être isolée de la spire voisine par une ou plusieurs couches d'une matière isolante et dure qu'une étincelle ne puisse percer que difficilement; de plus on doit éviter dans l'enroulement du fil de rapprocher trop près l'une de l'autre deux portions du circuit secondaire à potentiels très différents. A cet effet, on enroule le fil dans des compartiments successifs A, B, C (*fig.* 155) isolés l'un de l'autre par des cloisons en ébonite. Pour augmenter la rapidité du changement d'aimantation, on prend comme noyau soit un cylindre creux et fendu, soit un faisceau de fils de fer isolés l'un de l'autre.

En général, le circuit primaire est ouvert et fermé par le mouvement oscillatoire d'un marteau léger dont la tête est pourvue d'une petite masse de fer doux. Ce marteau est placé de manière à être

attiré quand le noyau de la bobine s'aimante; par son mouvement vers le noyau, il rompt le circuit primaire. Le noyau cessant alors d'être aimanté, le marteau retombe sur la borne qui le soutenait primitivement et de nouveau ferme le circuit primaire. Le noyau s'aimante une nouvelle fois et attire le marteau; le circuit est encore une fois rompu, et la même action se continue indéfiniment. A l'aide de pièces convenablement ajustées, on peut régler la rapidité des


Fig. 156.



oscillations du marteau, l'augmenter ou la diminuer, jusqu'à ce que le meilleur résultat soit atteint. La limite de la vitesse avec laquelle s'effectue la production des courants induits successifs dépend de la force coërcitive du noyau de fer et de la réaction d'induction du courant sur lui-même dans le circuit secondaire. Le travail accompli par le courant induit dans la bobine secondaire est nécessairement moindre que le travail effectué dans le circuit primaire par le courant de la pile; et cependant la force électromotrice peut devenir beaucoup plus grande dans le circuit secondaire.

La *fig.* 156 représente le grand modèle de la bobine Ruhmkorff. L'interrupteur M est distinct de l'appareil et actionné par une petite

pile dont les pôles sont reliés aux fils C et D. Cet interrupteur consiste en une tige verticale R qui décrit, quand elle est dérangée de son équilibre, des oscillations plus ou moins rapides suivant la position d'une boule mobile, et qui entraîne le levier IL; celui-ci porte à l'une de ses extrémités I une armature de fer doux placée en regard des pôles d'un électro-aimant et à son autre extrémité L deux pointes de platine plongeant dans deux godets à fond métallique qui contiennent du mercure ; l'un des godets sert aux interruptions du courant inducteur, et l'autre aux interruptions du courant de l'électro-aimant qui entretient les oscillations de la tige.

Nous allons maintenant faire la description d'une bobine d'induction construite par MM. Siemens. Le noyau est composé de fils de fer de $1^{mm},3$ de diamètre et de $0^{m},95$ de longueur. Ces fils sont réunis en faisceau et forment un cylindre de $0^{m},06$ de diamètre. Deux couches de fil de cuivre de $2^{mm},5$ de diamètre composent le circuit primaire. Ce fil de cuivre et le noyau de fer doux pèsent ensemble $15^{kg},830$. Ils sont placés dans un tube d'ébonite durci, épais de $0^{m},026$ aux extrémités et de $0^{m},012$ vers le milieu; 150 disques minces d'ébonite sont fixés le long de ce tube à des intervalles égaux, et les deux extrémités sont elles-mêmes garnies de plaques épaisses en ébonite. Chaque compartiment compris entre deux disques est rempli de fil de cuivre recouvert de soie et verni, de $0^{mm},14$ de diamètre. Ces compartiments forment autant de bobines qu'on réunit en série de telle façon que le courant circule de la couche extérieure à la couche intérieure dans un compartiment, et de la couche intérieure de celui-ci à la couche extérieure du compartiment voisin; de cette manière on n'a pas à craindre que deux portions de fils à des potentiels très différents se trouvent très rapprochées l'une de l'autre. Le circuit secondaire a $10\,755^{m}$ de longueur; il est formé de 299 198 tours de fil. Le poids de ce fil est de $26^{kg},332$ et sa résistance est d'environ 155 000 ohms.

Il y a quelque difficulté à établir un bon interrupteur, c'est-à-dire une pièce qui ferme et rompt le circuit par le mouvement du marteau; les longues étincelles qui s'échangent entre les deux surfaces de contact les fondent toutes deux et les oxydent. Dans l'appareil de MM. Siemens, le contact a lieu entre une pointe de platine et la surface d'un amalgame de platine ou d'argent recouvert d'alcool.

Quand on veut produire de longues étincelles, l'interrupteur est ralenti dans le mouvement oscillatoire que lui imprime soit un mécanisme d'horlogerie, soit un appareil électromagnétique spécial; il en résulte un contact prolongé, qui est alors soudainement rompu. L'appareil qu'on vient de décrire donne des étincelles de $0^{m},30$ à $0^{m},60$ de longueur avec 6 éléments Grove de grande dimension intercalés dans le circuit primaire. On a construit des bobines d'induction dont le fil a 80^{km} de longueur.

11. On rattache souvent une bouteille de Leyde ou tout autre condensateur au circuit secondaire quand on veut obtenir de longues et fortes étincelles. Tout près des pointes entre lesquelles doit s'échanger l'étincelle, on met l'une des extrémités du fil induit en contact avec l'une des armatures, et l'on fait communiquer l'autre avec la deuxième armature. Cette disposition a pour effet d'accumuler une énorme quantité d'électricité près des pointes, avant que la différence de potentiel soit assez grande pour déterminer le passage de l'étincelle; il en résulte que le nombre des étincelles observées dans un temps donné est moindre avec un condensateur que sans condensateur; mais chaque étincelle transporte une quantité d'électricité beaucoup plus grande et acquiert un éclat beaucoup plus vif. Une force électromotrice, qui dans la bobine secondaire serait trop faible pour déterminer le passage d'une étincelle, peut néanmoins suffire à charger les armatures du condensateur. On parvient ainsi à utiliser une partie de l'action inductive qui serait perdue comme effet extérieur sans la présence du condensateur. Le diélectrique interposé entre les armatures doit être épais et résistant ; sinon il serait inévitablement percé par l'étincelle.

On emploie fréquemment aussi un condensateur rattaché au circuit primaire.

12. On peut se servir de la bobine d'induction pour obtenir les étincelles nécessaires à l'analyse spectroscopique ou pour produire de la lumière électrique : toutefois l'intensité de cette dernière est relativement faible. On l'emploie encore pour charger les bouteilles de Leyde et provoquer des effets physiologiques, ou pour produire les beaux effets de lumière auxquels donne lieu le passage de

l'électricité à travers les gaz raréfiés. Ces gaz sont renfermés dans des tubes pourvus d'électrodes de platine qui sont soudées à la masse du verre et se terminent à l'intérieur du tube par de petites boules éloignées l'une de l'autre d'une distance considérable ; au lieu de la simple étincelle observée dans l'air, on voit une lumière diffuse, de couleur variable avec la nature des différents gaz et présentant de magnifiques stratifications. Ces effets de lumière ont été étudiés avec soin par Gassiot, Plücker et d'autres physiciens. Les tubes peuvent être recourbés de manière à recevoir des formes très compliquées, et l'on peut diviser leur intérieur en compartiments remplis de gaz différents. Ils produisent alors des effets de lumière remarquables, lorsqu'ils sont traversés par les courants induits de la bobine d'induction. On les désigne ordinairement sous le nom de *tubes de Geissler*. L'induction d'un aimant ou celle d'un courant électrique, ou même d'un simple conducteur à l'extérieur du tube, peut s'observer sur l'effluve lumineuse à l'intérieur; on voit cette effluve se déplacer dans la direction même du mouvement qu'imprimerait la force inductive à un conducteur solide traversé par un courant semblable. Pour cette expérience, le tube doit être large ou à peu près sphérique, de façon que l'effluve lumineuse n'occupe qu'une partie de l'espace enfermé par le tube.

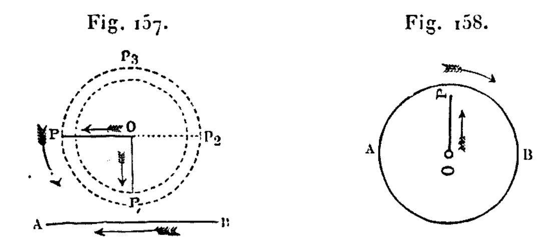
CHAPITRE XXI.

APPAREILS ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

1. Parmi les appareils destinés à produire un mouvement régulier sous l'action d'une force électromagnétique, le plus élémentaire est celui dans lequel un fil ou une tige de petite longueur, parcouru par un courant, tourne sous l'influence de l'attraction ou de la répulsion directe et continue, émanant d'un courant fixe de même intensité ou d'intensité différente.

Soit OP (*fig.* 157) un fil mobile autour du point O et traversé

Fig. 157. Fig. 158.



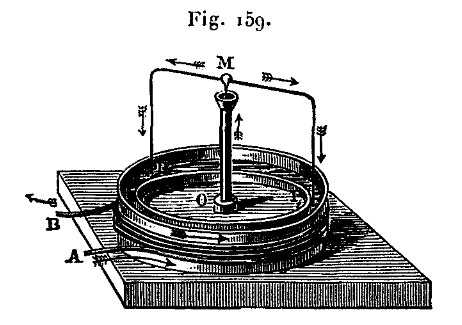
par un courant, dirigé du centre O vers la circonférence d'une rigole annulaire pleine de mercure dans laquelle plonge l'extrémité P du fil. Près des bords de la rigole est placé un fil rectiligne AB traversé par le courant de OP ou par un autre courant. Le fil OP sera attiré par AB jusqu'à ce que P atteigne la position P_1 (Chap. III n° 6); il sera alors repoussé jusqu'à ce qu'il atteigne la position P_3, puis il sera de nouveau attiré. On pourra donc ainsi produire une rotation continue dans le sens indiqué par la flèche,

si les autres parties du circuit sont disposées de telle sorte qu'elles ne détruisent pas la série des effets précédemment décrits. La force électromagnétique efficace que fournit cette disposition, même avec des courants très énergiques, est peu considérable.

Supposons maintenant que le courant fixe parcoure le cercle AB dans le sens de la flèche (*fig.* 158). Le fil mobile OP, dans lequel un courant est dirigé du centre vers la circonférence, sera sollicité continuellement à tourner en sens contraire du courant fixe. La force qui agit sur OP est très petite; mais on peut la multiplier en employant pour le conducteur AB une bobine composée d'un grand nombre de tours. On n'a pas encore trouvé de moyen commode pour multiplier de la même manière l'étendue du conducteur OP; et la force développée par l'appareil ainsi modifié est encore très petite.

Un courant circulaire horizontal tend aussi à produire une rotation continue d'un courant vertical qui s'en rapproche ou s'en éloigne. Concevons qu'un système mobile PMP_1 (*fig.* 159) soit

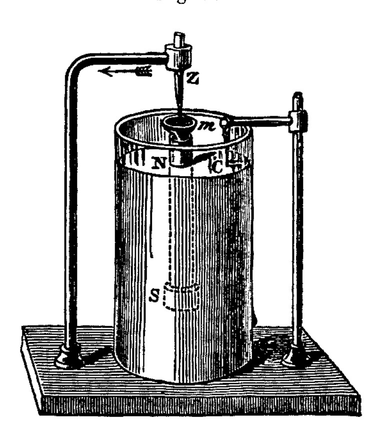
Fig. 159.



placé au centre d'un anneau fixe AB, traversé par un courant dans le sens indiqué par la flèche. Les extrémités P et P_1 plongent dans une rigole de mercure par l'intermédiaire de laquelle le circuit est maintenu fermé du centre O aux extrémités P et P_1. Les courants verticaux sont tous deux descendants; ils sont entraînés dans le même sens par l'action du courant fixe, et l'équipage mobile PMP_1 tend à tourner dans une direction opposée à celle du courant AB.

2. Sous l'influence d'attractions ou de répulsions électromagnétiques continues, un mouvement de rotation peut être imprimé à des courants par des aimants ou à des aimants par des courants. Soit (*fig.* 160) un aimant NS lesté de manière à flotter verticalement dans un vase rempli de mercure; cet aimant porte à son sommet une capsule pleine de mercure *m*, qui le met en communication avec l'un des pôles d'une pile par la pointe Z, sans l'empêcher de tourner; la surface de l'aimant doit être couverte d'une couche de vernis excepté à la partie inférieure. Si l'on établit au moyen d'un fil C le contact de l'autre pôle de la pile avec le mercure qui entoure l'aimant, on voit l'aimant tourner autour de son axe aussi longtemps que le circuit demeure fermé. On se rend facilement compte de ces mouvements, si l'on considère l'aimant comme une espèce de solénoïde; en effet une force agit entre chacun

Fig. 160.



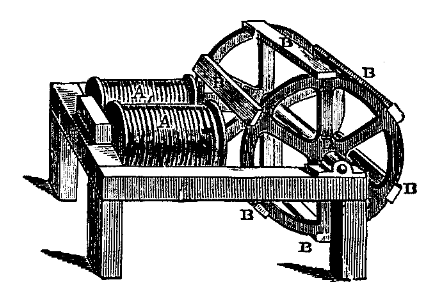
des cercles ou anneaux du solénoïde et le courant dirigé du centre à la circonférence, comme dans la seconde expérience du paragraphe précédent. Dans le cas présent, la force réciproque imprime un mouvement de rotation au cercle (solénoïde ou aimant), le courant dirigé du centre à la circonférence étant fixe.

D'autre part, supposons l'aimant fixe et faisons reposer sur son sommet par une pointe un équipage semblable à celui de la *fig.* 159,

dont les deux bouts verticaux P et P_1 plongent dans le mercure près de l'aimant; l'équipage se mettra à tourner sous l'action de l'aimant. Ce mouvement s'explique encore par la troisième expérience du paragraphe précédent, si nous continuons de regarder l'aimant comme un solénoïde.

3. La force mécanique qu'il est possible d'obtenir par ces dispositions d'aimants et de courants est si faible qu'on ne saurait s'en servir pour communiquer le mouvement à une machine; le nom d'appareils électromoteurs ne leur convient donc pas. En aimantant et désaimantant successivement des électro-aimants, on peut construire des électromoteurs qui transforment en effet mécanique extérieur une fraction considérable de l'énergie totale du courant électrique. Le plus simple de ces appareils électromoteurs est la machine à rotation de Froment. Elle consiste en un ou plusieurs électro-aimants en fer à cheval (*fig.* 161) tels que AA_1, fixés normalement à la surface latérale d'un cylindre ou tambour D mobile autour d'un axe. Sur la surface latérale de ce tambour mobile sont disposés, parallèlement à l'axe, une série de barreaux de fer doux, ou armatures B, B, B, etc. Lorsque le tambour tourne, il ferme successivement divers circuits à l'aide de contacts convenablement établis, et un courant énergique est envoyé dans chaque électro-aimant quand la distance angulaire de ses pôles à l'armature voisine est de 15° ou 20°; l'électro-aimant attire alors le barreau et fait avancer le cylindre. Le circuit est aussitôt interrompu et l'électro-

Fig. 161.



aimant perd sa vertu magnétique à l'instant même où l'armature passe devant ses pôles; le tambour continue son mouvement de rotation par un effet d'inertie ou par l'action d'un autre électro-aimant; puis une seconde armature est attirée par les pôles du premier électro-aimant après que la fermeture du circuit a été opérée comme précédemment. Les interrupteurs et les électro-aimants successifs fonctionnent de manière que le courant ne cesse dans un électro-aimant qu'après avoir passé dans l'électro-aimant suivant. Cette disposition a un double avantage : elle tend à rendre uniforme le mouvement imprimé au tambour, puis elle empêche l'effet nuisible des étincelles qui se produisent au moment où les contacts sont établis ou rompus. Ces étincelles ont pour effet de brûler les contacts et de les altérer graduellement au point de rendre impossible la fermeture du circuit.

On construit un autre genre d'électromoteur qui ressemble à une machine à vapeur ordinaire à balancier; le piston est représenté par un aimant qui est alternativement aspiré dans l'intérieur d'une bobine creuse et repoussé hors de cette bobine au moment où le sens du courant est renversé; quelquefois on emploie un piston en fer doux, qui est alternativement attiré, puis abandonné à lui-même.

4. Les électromoteurs auraient été l'objet d'études plus suivies et plus nombreuses si leur rendement mécanique était plus élevé : mais pour entretenir leur mouvement, il faut faire une dépense proportionnelle au moins 50 fois plus grande que celle exigée par la machine à vapeur. En effet le zinc est la moins chère de toutes les substances dont la combustion engendre de l'électricité. Or l'énergie développée dans la combustion d'un gramme de zinc est le $\frac{1}{10}$ seulement de celle développée par la combustion d'un gramme de charbon. Dans la combustion du zinc, une grande partie de l'énergie peut sans doute se transformer en courant électrique; tandis qu'on n'a encore découvert aucun moyen d'obtenir l'énergie intrinsèque du charbon sous une autre forme que celle de chaleur. Or une grande partie de cette chaleur est nécessairement perdue dans l'opération qui la convertit en énergie mécanique sensible. Au point de vue de la transformation d'énergie en effet mécanique, l'avantage

appartient à l'électricité. Mais l'énergie, sous forme de chaleur ou de courant électrique, ne peut jamais être entièrement transformée en effet mécanique. Dans les meilleures machines à vapeur, on n'utilise pas un quart de la chaleur totale et le plus souvent on n'en utilise guère que la dixième partie. Il est probable qu'avec un électromoteur on pourrait transformer en effet mécanique des fractions de l'énergie totale plus grandes que celles-ci; mais, quand même cet avantage serait réalisé, il ne compenserait pas le désavantage créé à l'électromoteur par le prix du zinc qui coûte 20 fois plus que le charbon à poids égal et 200 fois plus pour des quantités égales d'énergie potentielle. En admettant que l'engin électromagnétique soit quatre fois plus apte que la machine à vapeur à transformer l'énergie potentielle en énergie actuelle, on voit que le moteur électrique coûtera encore 50 fois plus cher que la machine à vapeur.

CHAPITRE XXII.

APPAREILS TÉLÉGRAPHIQUES.

1. Les appareils employés en télégraphie peuvent se partager en deux grandes classes :

1° Ceux qui transmettent des signaux représentant les lettres de l'alphabet en caractères purement conventionnels.

2° Ceux qui transmettent des signaux indiquant ou enregistrant les lettres mêmes de l'alphabet en caractères ordinaires.

Les appareils de la première classe sont les plus simples; car on choisit pour représenter les lettres de l'alphabet des symboles en rapport avec les indications que l'électricité produit le plus aisément dans un circuit télégraphique. D'autre part, ceux de la seconde classe présentent plusieurs avantages : ils suppriment les chances d'erreur qui résultent de la nécessité de traduire les signes télégraphiques en écriture ordinaire et ils n'exigent aucun apprentissage spécial pour la lecture des dépêches reçues. Chaque classe d'instruments présente un avantage particulier suivant l'usage qu'on en veut faire. Pour le service général de la télégraphie, confié dans chaque pays à une administration spéciale, on emploie presque exclusivement les appareils de la première classe et il est probable qu'il en sera toujours ainsi. Dans les établissements particuliers où les signaux sont lus et transmis par des personnes qui n'ont fait aucun apprentissage, ou bien dans les stations importantes où la présence d'appareils compliqués et d'électriciens expérimentés est justifiée, on continuera probablement de se servir, comme à présent, des appareils de la seconde classe qui indiquent chaque lettre sur un cadran portant l'alphabet ou bien l'impriment en caractères ordinaires.

Chacune de ces deux classes se subdivise en deux autres, l'une comprenant les appareils où le courant est engendré par une pile, et l'autre les appareils où le courant est produit par induction à l'aide d'une machine magnéto-électrique.

2. Un circuit télégraphique comprend : 1° Un fil isolé, reliant la station qui transmet à celle qui reçoit; 2° Le fil de l'appareil récepteur à la station d'arrivée; 3° La terre qui renvoie vers la station de départ le courant reçu par la station d'arrivée; 4° A la station de départ, *la pile* ou tout autre *électromoteur*, que l'on peut alternativement à l'aide du manipulateur relier à la ligne pour y transmettre le courant, ou isoler de cette ligne : le manipulateur met en jeu l'*appareil transmetteur*.

En général l'appareil transmetteur n'a pas d'autre fonction que d'établir ou rompre la communication entre la pile et la ligne, de sorte que la résistance du circuit fermé est la somme des résistances de la pile, de la ligne, du fil de l'appareil récepteur, et de la couche terrestre qui s'étend entre les deux stations. Lorsqu'on emploie une machine magnéto-électrique au lieu de pile comme appareil transmetteur, la résistance de ses bobines est substituée à la résistance de la pile. Sur les lignes terrestres, la netteté des signaux dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de l'intensité et de l'uniformité des courants transmis; pour éviter la dépense d'une pile ou d'un transmetteur magnéto-électrique de force électromotrice considérable, il convient de réduire la résistance de toutes les parties du circuit. Plus le fil de ligne sera gros, meilleure sera la transmission des signaux, quel que soit le genre d'appareil employé; mais le diamètre du fil a une importance beaucoup plus grande sur les longues lignes que sur les lignes courtes. Plus les plaques intérieures de la pile seront larges, plus intense sera le courant ; mais sur de longues lignes, la résistance de cette partie du circuit devient insignifiante en comparaison de celle de la ligne. Plus la résistance de l'appareil récepteur sera faible, meilleur sera le résultat ; mais cette résistance ne forme non plus qu'une petite fraction de la résistance totale sur de longues lignes. En général la résistance du sol entre les deux stations correspondantes est insensible si l'on a soin d'établir la communication avec la terre, à chaque station, à

l'aide de larges plaques enterrées profondément dans un sol humide. Il est quelquefois nécessaire de conduire le fil à une grande distance de la station pour trouver un endroit convenable où l'on puisse établir une bonne communication avec la terre. Parfois aucun signal n'est reçu parce que la communication à la terre fait défaut dans l'une ou l'autre station.

APPAREILS DE LA PREMIÈRE CLASSE.

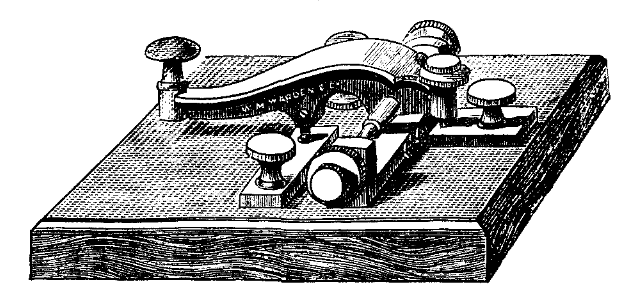
3. Tous les signaux sont produits par une succession de courants alternativement émis et interrompus; ces courants peuvent être ou positifs ou négatifs, c'est-à-dire être envoyés du pôle cuivre de la pile ou de son pôle zinc sur le fil de ligne, l'autre pôle de la pile étant toujours mis à la terre en même temps. Dans la première classe d'appareils, les éléments dont on dispose pour former chaque alphabet télégraphique sont :

1° La longueur ou la durée relative des courants;

2° Les intensités relatives de ces courants.

Ces intensités peuvent prendre, à partir de zéro, toutes les valeurs positives ou négatives correspondant aux courants positifs ou négatifs. Les signes les plus simples sont, d'une part, ceux qui enregistrent la transmission de deux courants d'inégale durée, l'un court et l'autre long; et, d'autre part, ceux qui indiquent simplement

Fig. 162.



l'arrivée de deux courants d'intensités contraires, l'un positif et l'autre négatif. L'*alphabet Morse* offre le type du premier genre; et l'*alphabet à une seule aiguille* est le type du second genre.

4. Les signaux Morse sont émis à l'aide d'un manipulateur à simple touche que l'opérateur abaisse pour envoyer le courant ou relève pour l'interrompre. La *fig.* 162 représente le modèle ordinaire. En général les parties isolantes sont faites de bois sec, dont la résistance est largement suffisante. En abaissant le manipulateur pendant un temps très court ou en donnant un coup léger sur sa touche, on envoie le signal élémentaire de courte durée qui s'appelle techniquement un *point;* si l'on tient le manipulateur abaissé pendant un temps plus long, on produit le signal élémentaire de longue durée qui s'appelle techniquement un *trait.* L'alphabet Morse est formé par une combinaison de points et de traits séparés par des intervalles égaux. Les lettres, assemblages de signaux élémentaires, sont séparées l'une de l'autre par des intervalles plus longs; des intervalles plus longs encore séparent deux mots l'un de l'autre.

La table suivante représente l'alphabet Morse; les petites lignes figurent les points; les lignes plus longues figurent les traits.

Lettres.

a	- —	ñ	— — - — —
ä (æ)	- — - —	o	— — —
b	— - - -	ö (œ)	— — — -
c	— - — -	p	- — — -
d	— - -	q	— — - —
e	-	r	- — -
é	- - — - -	s	- - -
f	- - — -	t	—
g	— — -	u	- - —
h	- - - -	ü (ue)	- - — -
i	- -	v	- - - —
j	- — — —	w	- — —
k	— - —	x	— - - —
l	- — - -	y	— - — —
m	— —	z	— — - -
n	— -	ch	— — — —

Signes de ponctuation.

Point (.)	- - - - - -
Deux points (:)	— — — - - -
Point et virgule (;)	— - — - — -
Virgule (,)	- — - — - —
Point d'interrogation (?)	- - — — - -
Point d'exclamation (!)	— — - - — —
Trait-d'union (-)	— - - - - —
Apostrophe (')	- — — — — -
Parenthèse ( )	— - — — - —
Guillemet (« »)	- — - - — -

Chiffres.

1 - — — — —	6 — - - - -
2 - - — — —	7 — — - - -
3 - - - — —	8 — — — - -
4 - - - - —	9 — — — — -
5 - - - - -	0 — — — — —

Signes conventionnels.

Barre de division	— — — — — —
Signal d'appel	— - — - — - —
Dépêche comprise	- - - — -
Dépêche non comprise à répéter	- - — — - -
Signal d'erreur	- - - - - - - - -
Fin de la transmission	- — - — - — -
Signal d'attente	- — - - -
Réception achevée	- — - - — - - — -
Alinéa	- — - — - -

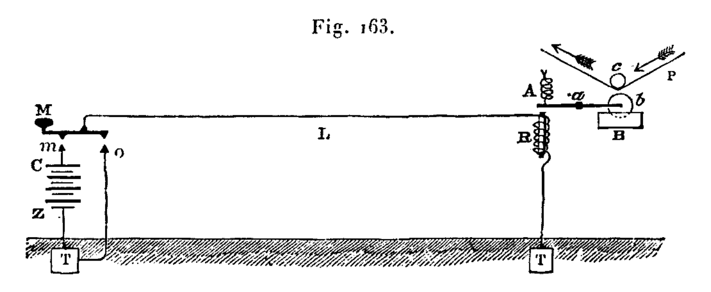
L'alphabet dont les éléments sont le courant positif et le courant négatif est exactement semblable au précédent; le trait, ou signal de longue durée, est remplacé par une marque sur le côté droit de la bande de papier ou par la déviation vers la droite d'une aiguille

indicatrice; le point, ou signal de courte durée, est figuré par une marque sur le côté gauche de la bande ou par une déviation de l'aiguille vers la gauche.

5. A l'aide de la disposition indiquée dans la *fig.* 163, des signes semblables à ceux de l'alphabet précédent sont marqués à l'encre sur une longue bande de papier qui se déroule à la station d'arrivée.

M est le manipulateur de la station qui transmet, et L est le conducteur isolé ou la ligne reliant la station qui transmet à celle qui reçoit; à cette dernière station le conducteur est attaché à l'un des bouts du fil d'un électro-aimant R, dont l'autre bout est mis directement en communication avec la terre T. En A se trouve une

Fig. 163.



palette en fer doux, mobile autour de l'axe a et pourvue d'une molette mince b qui tourne sans cesse en s'appuyant sur un tampon imbibé d'encre B. Au-dessus de cette molette, la bande de papier P se meut elle-même d'un mouvement continu dans le sens des flèches. Lorsque M est abaissé, un contact est établi en m avec l'un des pôles de la pile CZ dont l'autre pôle est à la terre; un courant s'élance dans le circuit et aimante le noyau de l'électro-aimant R. L'extrémité A de la palette s'abaisse; la molette est pressée contre le papier, et il s'y produit une empreinte noire dont la longueur dépend de la vitesse avec laquelle le papier se déroule et du temps pendant lequel M demeure abaissé. Si la touche M est relevée et met la ligne en communication avec le sol par le contact O, le courant est interrompu sur la ligne; le noyau de R perd son aimantation; la palette A se relève sous l'action d'un petit ressort antagoniste et le papier n'est plus marqué par l'encre de la molette. Ainsi

le manipulateur abaissé pendant un temps très court produit sur le papier une ligne très courte ou un point; abaissé pendant un temps plus long, il produit une marque plus longue ou un trait.

Sur la figure le manipulateur est représenté dans une position neutre; il n'établit la communication de la ligne ni avec O ni avec *m*. En réalité, il n'est jamais dans cette position; quand il n'est pas maintenu avec la main sur le contact *m*, il est en communication avec O.

La *fig.* 164 montre avec ses détails de construction un appareil Morse imprimeur du modèle de MM. Siemens frères. Nous reproduisons ici à peu près textuellement la description qu'ils ont donnée de cet appareil. E est l'électro-aimant animé par le courant qui passe dans le récepteur, N est une poignée qui sert à remonter le mouvement d'horlogerie.

Ce mouvement d'horlogerie, placé à l'intérieur de l'appareil, fait tourner un petit cylindre entraîneur W, ainsi que la molette d'impression D. Le cylindre frotteur W^1 est pressé sur W au moyen d'un ressort V et tourne avec le cylindre W. Le rouleau S de papier télégraphique, ou *papier-bande*, est enroulé sur la roue horizontale P qui tourne sur un pivot d'acier *a*. Ce système d'enroulement du papier-bande sur une roue horizontale, bien préférable au système de la roue verticale, est dû à M. Stroh. L'extrémité extérieure de la bande est engagée autour du cylindre S' qui tourne sur un axe vertical, puis sous le cylindre S", et passe ensuite au-dessus du cylindre *s* et au-dessous du petit cylindre en acier *i*; à cet endroit la molette d'impression frappe la bande quand la palette est attirée par l'électro-aimant E. Au delà du petit cylindre *i* la bande passe entre les cylindres entraîneurs W et W^1 qui en tournant font avancer le papier dans le sens des flèches. Le cylindre W^1 peut être soulevé avec la petite poignée X, ce qui permet d'engager facilement la bande entre les cylindres entraîneurs W et W^1. AA est un réservoir en laiton contenant une provision d'encre d'imprimerie; cette encre est introduite par une ouverture munie d'un couvercle *c* qui empêche la poussière d'y tomber; à l'extrémité de ce réservoir se trouve une petite auge ouverte *bb* dans laquelle tourne la molette d'impression D. Le réservoir AA est fixé sur la face latérale de l'appareil au moyen d'une vis à tête filetée C, ce qui

permet de le retirer aisément pour le remplir et le nettoyer. La

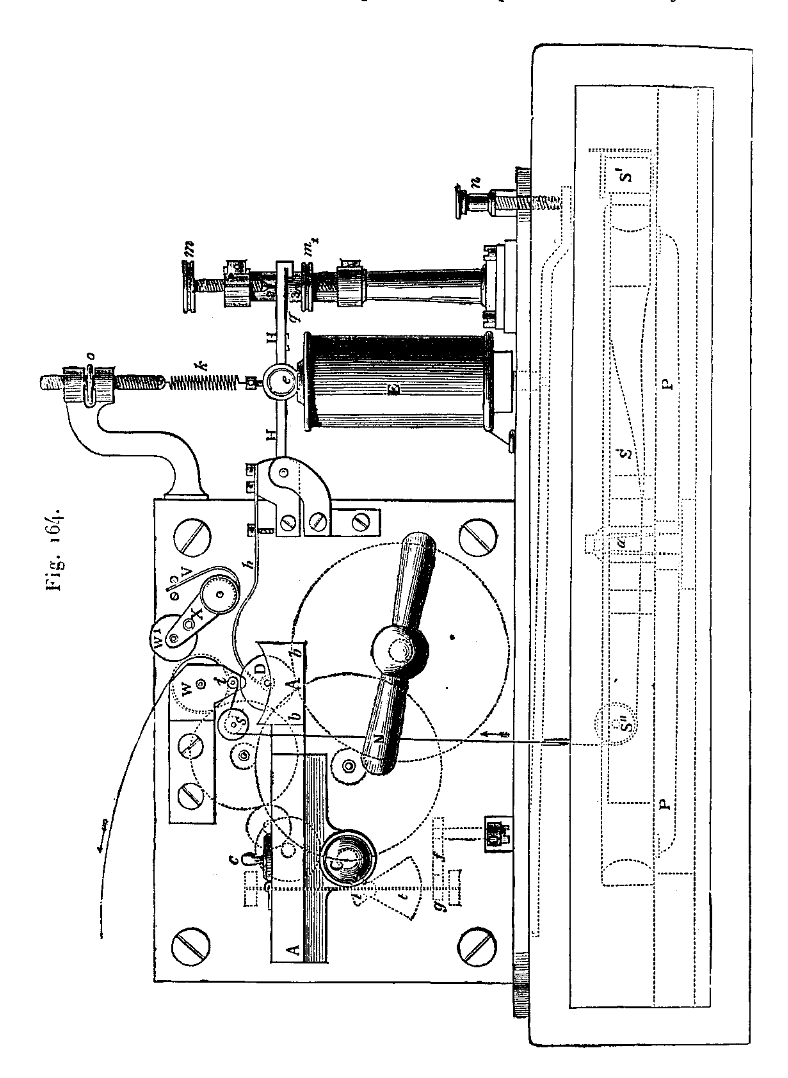


Fig. 164.

tige, qui porte à son extrémité la molette D, tourne dans un œil ménagé à l'extrémité du prolongement h du levier imprimeur HH.

Pour déterminer le mouvement de cette tige, on réunit l'extrémité opposée à la molette, par une sorte de joint universel, à un autre axe plus court pourvu d'une roue dentée qu'entraîne le mouvement d'horlogerie. La molette tourne ainsi d'une manière permanente tout en demeurant libre de suivre les mouvements du levier imprimeur.

Lorsqu'on veut arrêter le mouvement d'horlogerie, on porte la pédale Q vers la droite; le ressort *f* se trouve ainsi poussé vers la gauche et pressé contre le petit collier métallique *g* du régulateur *t*. Pour mettre en marche le mouvement d'horlogerie, on déplace la pédale Q en sens contraire.

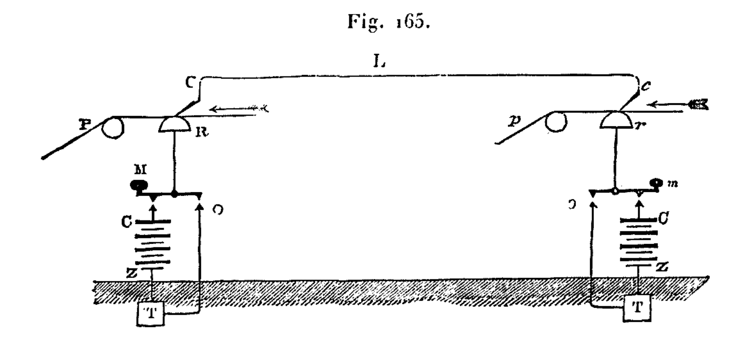
Les noyaux de l'électro-aimant sont en fer doux et réunis par une barre transversale; ils sont enveloppés par les fils des bobines. Le levier HH qui se meut entre les extrémités 2 et 3 des vis m et m_1 porte sur un de ses bras une armature de fer *e* et à l'extrémité de l'autre bras le prolongement *h*. Comme on l'a dit, un œil est ménagé sur ce prolongement, et l'extrémité de l'axe qui porte la molette d'impression D tourne dans cet œil.

Les vis de contact m et m_1 limitent le jeu du levier imprimeur HH. Pour ramener ce levier à sa position normale aussitôt que le courant cesse, on le fixe à un ressort *k* dont le degré de tension peut se régler au moyen de l'écrou *o*. L'appareil est pourvu aussi d'un autre réglage; à l'aide de la vis *n* à tête filetée, l'électro-aimant E peut être déplacé, c'est-à-dire élevé ou abaissé; de cette manière on diminue ou on augmente la distance qui existe entre l'électro-aimant et l'armature *e* du levier imprimeur HH.

Lorsque le circuit est fermé au point *m* (*fig.* 163) à la station de départ, le courant fourni par le pôle cuivre de la pile de cette station, après avoir parcouru la ligne, entre dans le récepteur R de la station d'arrivée, traverse les bobines E de l'électro-aimant (*fig.* 164), puis, sortant de l'appareil, revient à travers le sol au pôle zinc de ladite pile. Tant que le courant persiste, il maintient aimantés les noyaux en fer doux dont les extrémités supérieures attirent l'armature *e* et mettent ainsi en mouvement le levier imprimeur HH. Le prolongement *h* du levier imprimeur porte la molette D sur la bande et y produit un point ou un trait suivant la période de temps pendant laquelle l'armature demeure attirée par les noyaux.

Il y a plusieurs autres manières de recevoir et d'enregistrer les signaux Morse. Dans un grand nombre d'appareils de construction ancienne la molette *b* (*fig.* 163) est remplacée par une simple pointe d'acier ou style, qui creuse un léger sillon sur le papier lorsque l'extrémité opposée A du levier est maintenue abaissée. Dans le télégraphe chimique de Bain (*fig.* 165), l'électro-aimant R est entièrement supprimé. En abaissant le manipulateur M, on envoie un courant positif qui traverse R, C et L et enfin, à la station d'arrivée, un style d'acier *c*. Ce style s'appuie sur une bande de papier *p*, qui a été trempée dans un mélange en parties égales de solutions satu-

Fig. 165.



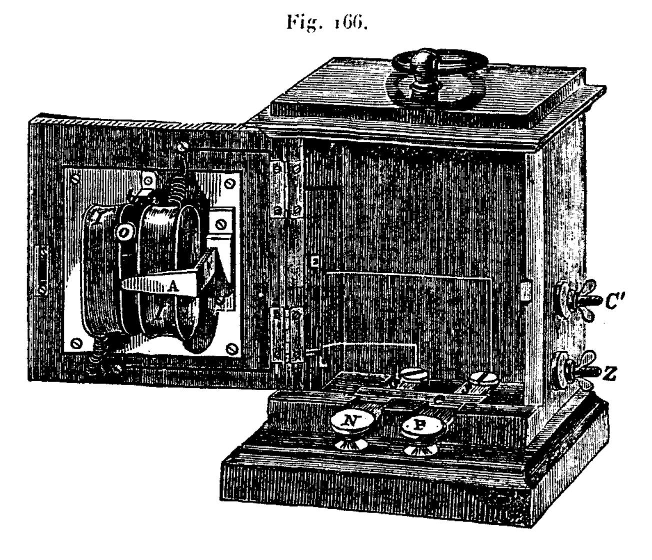
rées de ferrocyanure de potassium et d'azotate d'ammoniaque. Le courant traversant le papier passe sur *r*, puis se rend à la terre à travers le manipulateur *m*, dont nous supposons la touche relevée. La *fig.* 165 montre les communications établies de telle sorte que chacune des stations puisse envoyer des signaux. A la station d'arrivée, le manipulateur M ou *m* est maintenu en contact avec O ou *o*. Tant que le courant passe à travers le papier, un dépôt de bleu de Prusse se forme sur la bande et les signaux longs ou courts sont enregistrés par des lignes bleues longues ou courtes. La solution d'azotate d'ammoniaque doit renfermer un léger excès de carbonate d'ammoniaque.

Quelquefois les signaux Morse sont simplement indiqués à l'oreille ou à l'œil sans être enregistrés. Ainsi on peut même retirer (*fig.* 163) le papier-bande P; le seul battement de l'armature A, qui tombe et se relève, produit un son intelligible pour

l'oreille d'un agent expérimenté. Le *parleur*, comme on appelle l'appareil ainsi modifié, est fort en usage aujourd'hui; il consiste en un récepteur Morse sans mouvement d'horlogerie ni papier-bande ni molette d'impression. Le son est produit par le battement du levier H (*fig.* 164) contre les arrêts m et m_1. De même la simple déviation de l'aiguille d'un galvanomètre, placé en R (*fig.* 165) dans le circuit, fournit à l'œil des signaux intelligibles. Il suffit dans ce but que l'aiguille soit légère et que sa déviation soit confinée dans d'étroites limites, en sorte que chaque courant, en traversant le galvanomètre, produise un mouvement unique, franchement accentué et persistant pendant un temps plus ou moins long, et non pas une série d'oscillations librement accomplies.

6. La forme la plus simple du récepteur, pour des signaux positifs

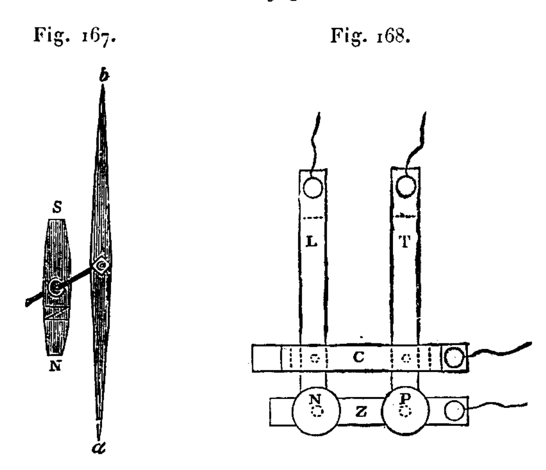
Fig. 166.



et négatifs, est un petit galvanoscope dont l'aiguille indicatrice ne peut s'écarter qu'à une faible distance, vers la droite ou vers la gauche, de sa position normale, c'est-à-dire du zéro; à cet effet ses mouvements sont limités par deux arrêts. La *fig.* 166 représente l'intérieur de l'appareil. En II sont les bobines, fixées sur la face

intérieure d'une petite porte qui s'ouvre pour permettre à l'opérateur de ranger et d'enfermer ses dépêches dans une sorte d'armoire; A est un montant sur lequel s'appuie l'un des pivots de l'aiguille; N et P sont les touches qui servent à l'émission du courant. Sur la *fig.* 167, on voit l'aiguille aimantée en SN et l'aiguille indicatrice en *ab*. Le manipulateur à l'aide duquel on envoie sur la ligne les courants positifs et négatifs d'une seule et même pile est représenté plus distinctement dans la *fig.* 168. L et T sont deux ressorts

Fig. 167. Fig. 168.

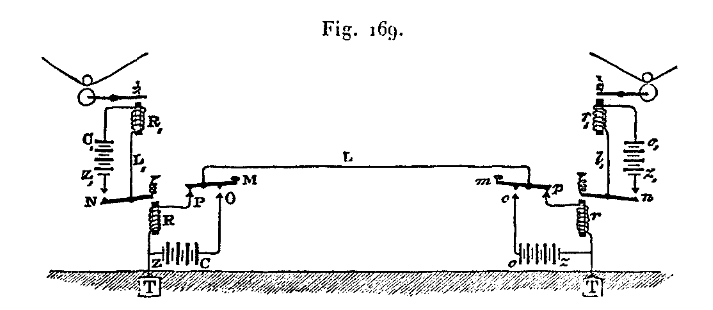


reliés respectivement à la ligne et à la terre. Dans leur situation normale, c'est-à-dire quand on n'y touche pas, ils pressent contre la plaque supérieure C qui communique avec le pôle cuivre d'une pile. Chacun de ces ressorts peut être abaissé avec le doigt et amené en contact avec la plaque Z qui communique avec le pôle zinc de la même pile. Si l'on abaisse L, on envoie un courant négatif sur la ligne; si l'on abaisse T, on envoie un courant positif. A la station correspondante le galvanoscope est réuni à la ligne, de telle sorte que la déviation ait lieu vers la droite ou vers la gauche suivant qu'on abaisse la touche de droite ou de gauche dans le manipulateur. Ce modèle de galvanoscope est appelé l'*appareil à simple aiguille;* il y a pour cet appareil un alphabet spécial, mais on emploie souvent aussi l'alphabet Morse, un point étant figuré par une déviation à droite et un trait par une déviation à gauche.

Bright a imaginé, pour remplacer l'appareil à une seule aiguille, le récepteur connu sous le nom d'*appareil à timbres*. Ce récepteur présente deux timbres sur chacun desquels vient battre la palette d'un électro-aimant; chacun des deux électro-aimants fonctionne sous l'influence d'un relais spécial; un de ces relais entre en jeu quand le courant reçu est positif, et l'autre quand ce courant est négatif. Cet appareil n'est plus guère employé aujourd'hui.

7. Les modes de communication indiqués plus haut sont ceux qui conviennent le mieux pour les lignes relativement courtes. Sur les

Fig. 169.



lignes plus longues on adopte en général des dispositions plus compliquées, qui comprennent l'usage de relais.

Le *relais* est un instrument qui sert à réexpédier avec une pile nouvelle un signal reçu d'une autre station; on peut l'employer soit pour diriger ce signal sur une seconde section de ligne, soit simplement pour envoyer dans le récepteur voisin un courant énergique fourni par une pile locale. Le courant reçu de la station correspondante est souvent trop affaibli par la déperdition pour animer l'électro-aimant du levier imprimeur ou pour donner des signaux susceptibles d'être lus ou entendus; et pourtant il peut être assez énergique encore pour mettre en mouvement une armature dont le rôle est d'établir et de rompre alternativement le courant et de mettre ainsi en action d'une manière indirecte l'appareil récepteur ou enregistreur. La *fig.* 169 représente l'ensemble des communications pour deux appareils Morse montés en relais et à simple courant.

On a indiqué par les mêmes lettres les parties des deux stations

qui se correspondent, les grandes lettres étant prises pour l'une des stations et les petites lettres pour l'autre. Dans l'une de ces stations, R sera le relais et CZ la pile qui envoie le courant sur la ligne; R_1 sera l'appareil Morse et $C_1 Z_1$ la pile locale qui met cet appareil en action. Lorsqu'on abaisse le manipulateur *m* de l'autre station pour le mettre en contact avec *o*, un courant positif passe sur la ligne L et arrive en M, puis par le contact P à l'électro-aimant R du relais et enfin à la terre. L'électro-aimant R attire l'armature du relais; un contact s'établit en N et un courant positif passe à travers R_1 qui est l'électro-aimant de l'appareil enregistreur.

On comprend que le récepteur R_1 peut se trouver dans une station éloignée de 100km de R; dans ce cas L_1 forme la seconde section de ligne dont nous avons parlé, et la portion du circuit, qui s'étend de Z_1 à R_1, est remplacée par la terre.

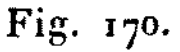
Les relais sont construits de telle sorte que, sous l'influence de la plus légère variation dans l'intensité du courant, la languette ou l'armature mobile passe du *contact de pile* N à la borne isolée ou inversement. Il faut encore avoir soin de pourvoir l'appareil de réglages tels que la languette se meuve sous l'action d'un courant d'intensité déterminée; par exemple, le relais peut être établi de telle sorte que la languette demeure sur la borne isolée pour un courant d'intensité nulle et fasse contact avec la pile pour une intensité de courant égale à l'unité, ou bien encore de telle sorte que la languette repose sur la borne isolée lorsque le courant a une intensité de 100 unités et fasse contact avec la pile lorsque le courant a une intensité de 101 unités.

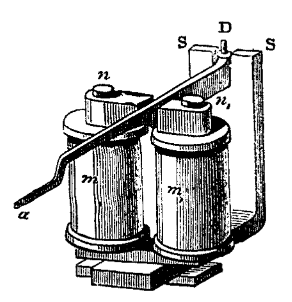
On construit souvent aussi des relais où la languette n'entre en mouvement que sous l'action de courants d'un signe déterminé et reste insensible aux courants de signe contraire; dans ce cas le noyau de l'électro-aimant est un aimant en acier non trempé dont la polarité n'est jamais renversée par les courants reçus.

On emploie encore un autre genre de relais où la languette, une fois amenée au contact de la pile, ne quitte plus ce contact, tant qu'un courant inverse n'est pas envoyé à travers le relais. Le meilleur modèle de ce genre est le relais polarisé de MM. Siemens que représente la *fig.* 170. S est le pôle sud d'un aimant en acier trempé dont le pôle nord est bifurqué et se termine en deux

branches n et n_1, entre lesquelles oscille la languette a du relais, montée sur un pivot D. Les fils des bobines sont enroulés en sens contraire autour des deux branches nord de l'aimant. Il en résulte qu'un courant de sens déterminé tend à produire un pôle nord en n_1 et un pôle sud en n, tandis que le courant de sens inverse tendrait à établir un pôle sud en n_1 et un pôle nord en n. La languette a est en fer doux et devient un pôle sud par son contact avec SS.

Les relais peuvent être disposés de façon à envoyer des courants


Fig. 170.



positifs ou négatifs correspondant aux courants positifs ou négatifs que reçoit le relais lui-même.

Il est aisé de modifier l'appareil Morse imprimeur de manière qu'il agisse à la façon d'un relais; on se sert de la palette destinée à l'impression pour établir les contacts nécessaires au lieu de l'utiliser pour marquer le papier. A l'aide d'appareils de cette espèce, MM. Siemens travaillent entre Londres et Téhéran sur la ligne indo-européenne, qui a 6000 kilomètres de longueur, sans qu'aucune réexpédition soit faite par la main d'un employé ; il y a cinq stations à relais dans ce circuit.

8. Pour les signaux de l'appareil Morse ordinaire ou de tous les autres appareils qui ne nécessitent que des courants de même signe, il y a néanmoins quelque avantage à se servir du courant négatif pour ramener l'armature mobile à sa position de repos et terminer ainsi chaque signal. Ce système, imaginé par M. Varley, simplifie considérablement le réglage des relais ; il présente d'ailleurs d'autres

avantages. Lorsqu'on ne fait pas usage de ces courants de sens inverse, la languette du relais doit être ramenée en arrière par un ressort ou une attraction magnétique, dont le réglage a besoin d'être modifié sans cesse. En effet, on est obligé d'approprier sans cesse ce ressort ou cette attraction à l'intensité du courant reçu, intensité qui varie sensiblement dans le cours de chaque journée suivant que l'isolement de la ligne varie lui-même. Avec un relais polarisé et l'emploi des courants positifs et négatifs, un réglage de ce genre devient inutile, parce que les courants positifs et négatifs diminuent en même temps d'intensité.

S'il n'y avait pas de *courants terrestres*, un bon relais polarisé, qu'on aurait ainsi réglé une fois pour toutes pour le *travail à double courant* n'aurait jamais besoin d'être modifié: en réalité il n'y a pas de relais qui ne nécessite un réglage de temps en temps. Les courants terrestres sont des courants qui apparaissent sur une ligne, sans que les piles des stations interviennent dans leur formation; ils sont le résultat, soit d'une différence entre les potentiels de la terre aux deux stations, soit d'une induction produite par des nuages qui passent au-dessus de la ligne. Souvent des courants de même sens subsistent pendant des heures entières sur une ligne, et les courants de signaux se superposent sur ces courants terrestres : les relais doivent alors être établis de telle sorte que, quand aucun signal n'est transmis, la languette soit attirée plus fortement par une branche que par l'autre; il faut régler la valeur de cette différence d'action sur la variation d'intensité des courants terrestres.

9. Lorsque les communications sont établies de la manière indiquée par la *fig.* 169, il arrive que chacun des signaux émis détermine le mouvement du relais à la station qui transmet, si la ligne est longue et bien isolée ou si elle renferme un certain nombre de kilomètres de fil souterrain ou sous-marin. Cet effet ne peut être produit directement par la pile de la station qui transmet, puisqu'elle n'envoie aucun courant direct dans le circuit de son relais; il est dû à la charge statique qui s'accumule sur la ligne L. Quand le contact est établi en O par le manipulateur M, la ligne L prend une charge statique. Quand le contact est rompu

en O et établi en P, une partie de cette charge statique s'écoule dans la terre par le relais R, tandis que le reste s'écoule dans la terre par le relais *r* de l'autre station. Ainsi, lorsque le manipulateur M établit ou rompt le contact en O, des courants intermittents passent dans le relais de la station qui transmet et mettent en action son récepteur R_1. Non seulement cet effet est sans utilité: mais il est nuisible, car les courants qui reviennent ainsi sur eux-mêmes sont souvent assez énergiques pour altérer l'aimantation permanente du relais ou son magnétisme rémanent. Ce relais a alors besoin d'un nouveau réglage quand des signaux arrivent de la station correspondante; de plus la pile locale C_1Z_1 est mise inutilement en action par ces courants de retour. Le courant de retour est surtout très intense lorsque, sur une partie de la ligne L, le conducteur est recouvert de caoutchouc ou de gutta-percha; car une ligne ainsi constituée a une capacité électrostatique beaucoup plus grande qu'un fil ordinaire suspendu dans l'air. Lorsque cet inconvénient se présente, chaque station doit être pourvue d'un appareil nommé *commutateur* qui permet de modifier à volonté les communications; par exemple, si la station M transmet (*fig.* 169), le relais R n'est plus dans le circuit compris entre les points P et T, lesquels sont alors reliés directement.

Parfois le manipulateur M est disposé de façon à mettre pendant quelques instants la ligne à la terre quand il passe de la position de contact en O à la position de contact en P.

On peut employer, pour décharger la ligne, une disposition encore plus satisfaisante; dans ce nouveau système, l'action même du courant qui part de la station M met P à la terre à l'aide d'un relais distinct, et l'y maintient, par un effet de magnétisme rémanent, un instant très court encore après que le manipulateur M a rompu le contact en O et établi le contact en P. De cette manière la station qui reçoit peut interrompre à volonté celle qui transmet.

10. Dans la construction des appareils télégraphiques il faut s'attacher aux règles suivantes:

Le noyau de l'électro-aimant doit être disposé de telle sorte que son aimantation change rapidement dès que le courant commence ou cesse; s'il en était autrement, les changements d'aiman-

tation produits par une succession de courants rapidement alternés ne seraient pas enregistrés par l'armature mobile. A ce point de vue le noyau, s'il est de fer doux, devra avoir une faible masse; on aura soin de le faire creux et de le fendre dans le sens de la longueur, et l'on choisira pour ce noyau un fer dont la force coercitive soit aussi petite que possible. Les noyaux fortement aimantés des relais polarisés acquièrent et perdent, plus rapidement que les noyaux de fer doux, les faibles accroissements d'aimantation dûs aux courants peu intenses : le retard produit par la force coercitive est moindre dans les premiers que dans les seconds.

La force coercitive des armatures mobiles est une autre cause de retard pour les courants rapidement alternés. Aussi convient-il que ces armatures soient légères et qu'elles n'aient point à passer par des variations d'aimantation considérables. Si, par exemple, l'armature venait à toucher le noyau de l'électro-aimant, elle serait assez fortement aimantée pour demeurer adhérente au noyau sous l'influence du magnétisme rémanent et malgré l'affaiblissement déterminé dans l'électro-aimant par la cessation du courant; il faudrait alors un ressort très énergique pour la ramener en arrière, et, par suite, un courant très intense pour la porter vers l'électro-aimant malgré la résistance du ressort antagoniste. Le relais le plus délicat est celui dans lequel, toutes choses égales d'ailleurs, l'armature se meut dans un champ magnétique à peu près constant, dont l'intensité est alternativement augmentée ou diminuée par le courant reçu. Cependant le changement produit dans le champ magnétique de électro-aimant par le passage d'un courant doit être aussi grand qu'il est possible de l'obtenir avec ce courant, et cette condition exige que la masse du noyau en fer ou en acier ne soit pas très petite; d'un autre côté il est nécessaire qu'une certaine pression soit exercée sur les contacts; à défaut de cette pression, la languette du relais éprouverait un tremblement sous la seule influence du passage du courant, qui exerce sur lui-même une action répulsive; pour obtenir la pression nécessaire, il faut donner à la languette une masse considérable. On voit que ces nouvelles conditions sont contraires à celles précédemment indiquées, et l'expérience seule peut éclairer sur les dimensions qu'il convient d'attribuer au noyau et à l'armature. L'électro-aimant doit avoir la forme qui

produit le champ le plus énergique et le plus uniforme possible pour une aimantation d'une intensité donnée. Cette condition n'est satisfaite en aucune façon dans le relais ordinaire ou dans l'appareil imprimeur, où l'armature traverse la ligne des pôles d'un aimant ordinaire en fer à cheval. Elle est remplie à un degré plus satisfaisant par le relais polarisé Siemens que nous avons décrit plus haut. La forme du noyau de fer ou d'acier et la distribution de sa matière par rapport au fil de la bobine doivent être telles que l'intensité maximum d'aimantation par centimètre cube du noyau soit obtenue avec un courant d'intensité donné, traversant un fil de longueur donnée. Cette condition est probablement remplie très imparfaitement dans tous les relais qui ont été construits jusqu'à présent.

On doit répartir la masse de l'armature de façon que son moment d'inertie soit le plus petit possible, en tenant compte du poids nécessaire de cette armature et de la position des pivots. Toute augmentation du moment d'inertie produit une diminution proportionnelle de la vitesse angulaire avec laquelle la languette se meut sous l'action d'une force donnée, et la vitesse avec laquelle le relais fonctionne dépend de cette vitesse angulaire. Si le moment d'inertie devient deux fois plus grand sans que la force change, la vitesse angulaire acquise au bout d'un temps donné se trouve réduite à moitié; pour parcourir la même distance angulaire, c'est-à-dire pour passer d'un contact à l'autre, il faudra, t désignant le temps employé par la première armature, un temps égal à $t\sqrt{2}$ ou $t \times 1,414$. Rappelons que le moment d'inertie est la somme des produits du poids de chaque élément de masse par le carré de sa distance à l'axe autour duquel tourne la masse. Lorsqu'on veut imprimer à un corps, à l'aide d'une faible force, un mouvement de rotation rapide, il convient donc non seulement que ce corps ait peu de poids, mais encore qu'il soit placé dans le voisinage de l'axe de rotation.

Toutefois il est sans inconvénient de placer l'axe de rotation loin des points de contact parce qu'on diminue ainsi l'angle que l'armature doit décrire entre les deux contacts ; si l'on réduit cet angle de moitié en même temps qu'on double le moment d'inertie, l'un de ces changements compense exactement l'effet de l'autre.

La résistance du fil de l'électro-aimant dans l'appareil Morse ou de la bobine dans l'appareil à simple aiguille doit être une fraction

assez petite de la résistance totale du circuit ([1]). Ainsi, pour les lignes courtes, le fil de l'électro-aimant doit être gros et court; sur les lignes longues, les relais doivent être formés de fils longs et fins. Ces règles, que nous rappelons ici, sont fondées sur les considérations déjà présentées à l'occasion des galvanomètres : pour les essais d'isolement, les galvanomètres sont composés d'un grand nombre de tours de fil; pour la mesure des courants traversant des circuits de faible résistance, ils doivent être formés d'un petit nombre de tours de fil.

Les appareils ordinaires à simple aiguille ont une résistance d'environ 200 ohms; la bobine est formée de fil de $0^{mm},127$ de diamètre.

La bobine de l'appareil Morse imprimeur sans relais, dont on se sert pour les lignes courtes, est faite d'un fil de $0^{mm},127$ de diamètre; elle offre une résistance d'environ 500 ohms.

Les électro-aimants des récepteurs à relais sont faits avec des fils dont le diamètre varie de $0^{mm},560$ à $0^{mm},305$.

Les relais polarisés Siemens se font avec du fil de cuivre de $0^{mm},115$ de diamètre et présentent une résistance de 500 à 700 ohms. Ces relais ont quelquefois une résistance de 3500 ohms.

Tous les contacts doivent être formés de pointes de platine; le platine est le seul métal qui ne soit pas oxydé ou sali par le passage de la petite étincelle qui accompagne la fermeture et la rupture du circuit. Avec le temps cette étincelle use même les contacts en platine. On peut remédier à cet inconvénient en établissant les deux contacts en communication permanente à travers une résistance assez grande pour que le courant dérivé qui passe au moment de la rupture du contact soit trop faible pour être nuisible. On arrive au même résultat en plaçant un petit condensateur entre les contacts : chacun d'eux est relié à l'une des armatures du condensateur.

11. Au lieu d'une pile, on peut se servir d'un appareil magnéto-électrique pour envoyer des courants. On peut par exemple utiliser

([1]) Suivant l'affirmation d'un ingénieur compétent, cette résistance doit être les $\frac{5}{16}$ de la résistance totale du circuit; mais cette valeur nous semble exagérée.

l'armature Siemens (Chap. XX, n° 7) qu'on manœuvre à la main; les mouvements imprimés à la poignée de l'armature sont semblables à ceux qu'exécute le manipulateur Morse. En abaissant la poignée, on fait mouvoir l'armature dans un sens et on envoie, par exemple, un courant positif qui agit sur un relais polarisé et force le levier imprimeur à produire une marque sur le papier. Tant que l'armature demeure abaissée, la marque continue à se produire, bien qu'aucun courant ne traverse le relais; car la languette du relais est maintenue sur le contact de pile par l'aimantation permanente de l'aimant du relais. En relevant la poignée et ramenant l'armature à sa position primitive, on envoie un autre courant de courte durée et de sens contraire au premier. Ce second courant rejette en arrière la languette du relais, et la marque cesse de se produire. Le courant produit est l'équivalent de l'énergie dépensée pour manœuvrer l'armature; il faut donc développer une force considérable pour envoyer un courant d'intensité suffisante sur un long circuit. On emploie d'autres appareils électromagnétiques pour l'émission des signaux positifs et négatifs qui doivent être recueillis par le récepteur à simple aiguille. Les courants induits sont de très courte durée, et par suite, bien que la force électromotrice qui les produit puisse aisément être rendue beaucoup plus grande que la force électromotrice des piles employées habituellement pour produire des signaux, la quantité d'électricité effectivement transmise pour chaque signal est généralement beaucoup moindre que celle fournie par une pile.

Sur une ligne étendue, le courant reçu a une durée plus longue que le courant émis et il est affaibli en proportion de cette durée; sur une ligne peu étendue, le courant reçu et le courant émis ont tous deux une durée si courte qu'ils peuvent, même en agissant avec une grande intensité, être incapables de mouvoir une armature qui fonctionnerait sans difficulté sous l'action d'un courant plus faible, mais prolongé plus longtemps. La force électromotrice produite par l'appareil magnéto-électrique est si considérable près de la station qui transmet, que la perte relative, c'est-à-dire le rapport de la perte absolue à la quantité totale d'électricité transportée, est beaucoup plus grande avec un appareil de cette nature qu'avec une pile. Il n'en serait pas de même si la

résistance des défauts, par lesquels l'électricité s'échappe, suivait la loi d'Ohm; mais la résistance des défauts ne suit que rarement cette loi. En raison du mouvement de l'électricité à la surface, qui est la cause principale de la déperdition sur les lignes terrestres, la quantité d'électricité qui s'échappe ainsi est plus que doublée quand la force électromotrice est doublée. Sur les lignes souterraines ou sous-marines, le haut potentiel, produit pendant un court intervalle de temps par le transmetteur magnéto-électrique, tend à envoyer de petites étincelles à travers l'enveloppe isolante et par suite à endommager ces lignes.

Pour tous ces motifs, les transmetteurs magnéto-électriques sont peu employés sur les lignes longues ou importantes.

12. Sur un manipulateur Morse à simple ou à double touche un employé habile peut obtenir une vitesse de 25 à 35 mots par minute (de 5 lettres chacun). Or les appareils de réception sont capables d'enregistrer par minute un nombre de mots beaucoup plus grand et même supérieur à 100. On a donc adopté des transmetteurs automatiques pour lesquels les dépêches sont, à l'aide d'agents spéciaux, figurées par des trous pratiqués sur la bande ou par des caractères métalliques; les bandes ainsi préparées ou ces caractères passant dans le transmetteur déterminent la succession des courants nécessaires pour reproduire les dépêches. Le transmetteur automatique de sir Charles Wheatstone est jusqu'à présent celui qui a donné les meilleurs résultats. Dans cet instrument, les dépêches sont figurées par trois rangées de trous pratiqués dans une bande de papier; un trou de la rangée inférieure représente un courant positif ou un point; un trou de la rangée supérieure représente un courant négatif ou un trait. Les trous également espacés de la rangée du milieu servent simplement à entraîner le papier avec une vitesse constante. Les trous des rangées *inférieure et supérieure* déterminent les contacts et l'émission des courants nécessaires; c'est un procédé semblable à celui par lequel les cartons troués du métier Jacquard déterminent la reproduction du modèle dans le tissu fabriqué. Les contacts sont établis ou rompus suivant la position de deux petites aiguilles, qui restent au-dessous du papier quand elles ne rencontrent pas de trou, ou qui s'élèvent en passant par

les ouvertures. Toutes les fois qu'une aiguille passe par un trou, un courant est envoyé sur la ligne; un courant positif quand le trou est sur la rangée inférieure, et négatif quand il est sur la rangée supérieure. Les contacts sont produits par une pression accompagnée d'un léger glissement au moment où ils s'établissent; ces contacts valent mieux que tous ceux où les surfaces rapprochées glissent simplement l'une sur l'autre. A l'aide d'une disposition un peu plus compliquée, mais analogue, on envoie les signaux longs et courts de l'appareil Morse. Le lecteur trouvera une description complète de cet appareil dans le *Manuel de télégraphie pratique* de M. Culley (¹).

APPAREILS DE LA DEUXIÈME CLASSE.

13. Les signaux élémentaires employés dans ces appareils, qui indiquent ou impriment les lettres de l'alphabet, sont produits, comme ceux des appareils de la première classe, par des émissions ou interruptions alternatives de courants. Tantôt ces courants sont tous de même signe; tantôt ils sont alternativement positifs et négatifs; mais ce ne sont pas ces émissions ni ces interruptions elles-mêmes qui sont directement observées ou enregistrées : elle ne servent qu'à déterminer le déclanchement d'un mouvement d'horlogerie dans les instruments appelés *récepteurs à cadran,* ou qu'à produire l'accord dans la marche des deux appareils transmetteur et récepteur que gouvernent des mouvements identiques aux deux extrémités de la ligne.

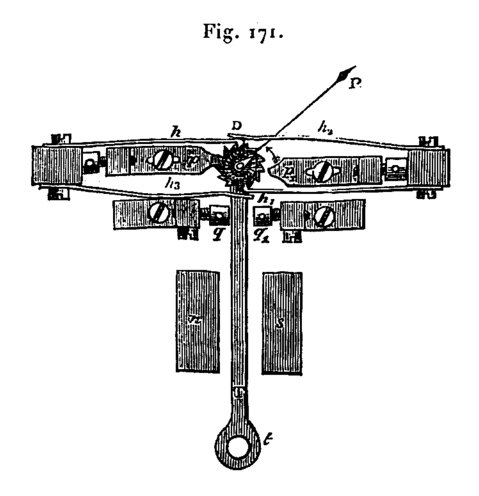
Les appareils à cadran impriment quelquefois les dépêches; mais le plus souvent ils indiquent sur un cadran, à la suite l'une de l'autre, les lettres successives de la dépêche. Tous les appareils à mouvement synchronique impriment les lettres; mais cette impression s'opère suivant des procédés divers et distincts dont les plus remarquables sont ceux des appareils Hughes, Caselli et Bonelli.

Les appareils à cadran se ressemblent tous. Une roue à rochet,

(¹) Une traduction française du *Manuel de Télégraphie pratique,* de M. Culley (7ᵉ édition), par MM. Berger et Bardonnaut, a été publiée par M. Gauthier-Villars, à Paris (1882).

montée sur un axe qui porte l'aiguille indicatrice, est soumise à l'action d'un mécanisme qui, à chaque passage d'un courant, fait tourner la roue de la quantité angulaire correspondant à une dent ou à une demi-dent. La *fig.* 171 représente le modèle construit actuellement par MM. Siemens; il diffère très peu d'ailleurs du modèle primitivement imaginé par sir Charles Wheatstone : n et s sont les deux pôles d'un électro-aimant polarisé et semblable à

Fig. 171.



l'électro-aimant du relais Siemens (n° 7 ci-dessus). La languette de fer doux T se déplace entre ces pôles en tournant autour du pivot t; elle est attirée vers s par l'un des courants et vers n par le courant de sens inverse. A sa partie supérieure la languette supporte l'une des extrémités de l'axe de la roue à rochet, pourvue de 13 dents; l'autre extrémité de cet axe est soutenue sur un tourillon fixe et porte l'aiguille indicatrice. Le jeu de la languette T est limité par deux arrêts q et q_1; le mouvement de rotation de la roue est réglé par deux arrêts p et p_1, et par quatre ressorts h, h_1, h_2, h_3, dont deux, h et h_1, se terminent par un cliquet destiné à retenir la roue. Dans la figure, la languette T est attirée vers n; la roue est arrêtée par le ressort h et ne peut tourner vers la droite; elle ne peut pas non plus tourner vers la gauche, étant maintenue par l'arrêt p. La

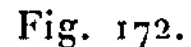
position de l'aiguille indicatrice est donc parfaitement définie et stable.

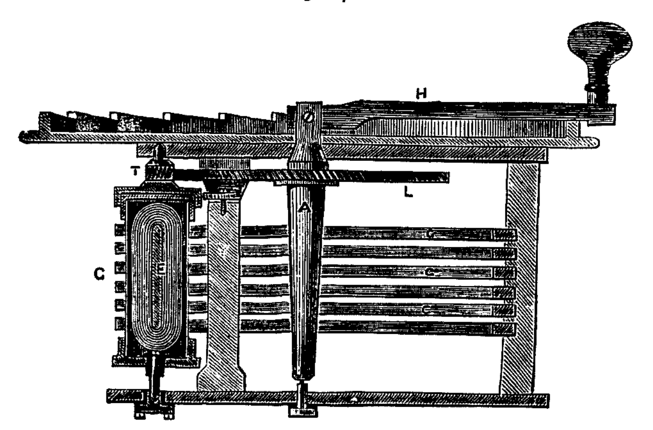
L'émission du courant inverse qui va suivre attirera la languette T vers s; le ressort h fera tourner la roue de $\frac{1}{26}$ de tour: et elle se trouvera alors en prise avec le ressort h_1 et l'arrêt p_1. De même, le courant suivant fera tourner la roue d'une quantité égale en la portant vers n. On voit donc que chacun des courants successifs fait avancer l'aiguille sur le cadran de $\frac{1}{26}$ de tour; le cadran porte les 25 lettres de l'alphabet et un blanc.

Lorsque 26 courants, dont 13 positifs et 13 négatifs, auront été émis, l'aiguille aura accompli sur le cadran une révolution complète. Supposons qu'elle marque la lettre A; une émission du courant la portera sur la lettre B; trois autres émissions la porteront sur la lettre E et sept nouvelles émissions sur la lettre L, les lettres I et J étant réunies ensemble sur le cadran. Supposons qu'on envoie le nombre convenable de courants et qu'on s'arrête ensuite un instant; l'aiguille avancera sur le cadran d'une lettre à l'autre et se fixera sur la lettre qu'on veut indiquer. Tantôt l'aiguille est entraînée par un mouvement d'horlogerie, et les dents d'une roue d'échappement sont mises en liberté par les courants; tantôt la roue d'échappement est remplacée, comme dans l'exemple précédent, par un mécanisme disposé de telle sorte que chaque oscillation de l'armature fasse avancer d'une dent la roue à rochet. C'est cette dernière disposition qui est le plus communément adoptée aujourd'hui.

La station qui transmet envoie le nombre convenable de courants au moyen d'un manipulateur spécial formé d'un cadran et d'une manivelle à poignée qui peut tourner en passant successivement sur toutes les lettres du cadran. Celles-ci correspondent, pour le nombre et l'arrangement, aux lettres marquées sur le cadran du récepteur. La manivelle se meut toujours dans le même sens et envoie des courants alternativement positifs et négatifs au moment où elle passe sur chaque lettre. Quand l'aiguille du récepteur et la manivelle du manipulateur ont été une fois mises en face de la même lettre, l'employé qui transmet n'a plus qu'à amener sa manivelle avec une vitesse modérée sur les lettres qu'il désire successivement indiquer. En opérant ainsi, il envoie précisément le nombre des

courants nécessaires pour amener l'aiguille du récepteur correspondant sur la lettre même indiquée par son propre manipulateur. Si un ou plusieurs courants viennent à manquer leur effet sur l'aiguille du récepteur, l'employé qui reçoit *coupe* la transmission de son correspondant pour l'aviser que ses signaux ne sont pas compris, et tous deux mettent leurs instruments sur la même lettre ou le même signe conventionnel au moyen d'une disposition mécanique spéciale et sans qu'aucun courant soit envoyé; la station qui


Fig. 172.



transmet recommence alors la dépêche à partir de l'endroit où elle était devenue inintelligible. Les courants émis par le mouvement de rotation de la manivelle peuvent être fournis par une pile ou, comme cela a lieu le plus communément, par un appareil magnéto-électrique. La *fig.* 172 représente le transmetteur magnéto-électrique de MM. Siemens.

La manivelle H est fixée sur l'axe A qui porte la roue dentée L engrenant avec le pignon T de l'armature cylindrique E. Celle-ci est montée verticalement sur pivots entre les pôles d'une série d'aimants permanents G, G, G. Lorsque la roue L, ou la manivelle H qui la met en mouvement, accomplit une révolution, le pignon de l'armature fait 13 tours; car le nombre des dents de la roue est dans

le rapport de 13 à 1 avec le nombre des dents du pignon. Une révolution complète de l'armature développe deux courants de sens contraires dans la bobine de fil isolé qui fait corps avec cette armature; 26 courants, alternativement positifs et négatifs, sont donc produits pendant une révolution de la manivelle. Le cadran est divisé, comme précédemment, en 26 parties pour les 25 lettres de l'alphabet (les lettres I et J ne comptant que pour une lettre) et pour le blanc.

L'appareil magnéto-électrique à cadran avec aiguille indicatrice des lettres, imaginé par Wheatstone, est peut-être le plus satisfaisant qui existe jusqu'à présent.

Quand on se sert d'une manivelle pour mettre en mouvement l'armature de la bobine d'induction d'un appareil magnéto-électrique, les courants induits sont généralement d'intensités très inégales parce que la vitesse communiquée par la main de l'opérateur se trouve naturellement ralentie au commencement comme à la fin du mouvement. C'est pourquoi sir Charles Wheatstone soumet l'armature magnéto-électrique à une rotation continue, et il règle le nombre des courants émis sur la ligne au moyen d'une série de bornes correspondant aux 30 lettres ou signes conventionnels disposés autour du cadran. Le mécanisme qui produit le mouvement de la roue du récepteur est admirable sous le rapport de la légèreté et de la précision. Ce petit instrument est principalement en usage sur les lignes d'intérêt privé, qui sont peu étendues; mais on s'en est servi sur des circuits de plus de 160^{km} de longueur.

14. L'appareil à cadran imprimeur diffère peu de l'appareil à cadran avec aiguille indicatrice des lettres. Sur le contour d'un anneau sont disposés les caractères représentant les lettres et les autres signes conventionnels nécessaires. Cet anneau tourne sous l'action d'un mécanisme spécial ou à l'aide d'une roue à échappement et d'un mouvement d'horlogerie; chacune des lettres est ainsi amenée par la rotation du cercle en face du papier destiné à recevoir l'impression. A cet instant le papier est frappé contre la lettre sur l'anneau au moyen d'une disposition particulière qui varie suivant les divers appareils. Tantôt le simple arrêt du cadran suffit pour déterminer l'action du marteau frappeur ou imprimeur, tantôt les cou-

rants positifs seuls sont utilisés pour le mouvement de la roue et un courant négatif, émis au moment où la lettre demandée arrive au-dessous du papier, détermine l'impression par le choc du marteau ; tantôt enfin on se sert d'un second fil de ligne pour donner le coup qui imprime la lettre. Le papier avance alors d'un petit intervalle. Ces appareils sont peu employés. On remarquera que le nombre des courants alternatifs nécessités par chaque lettre dans les appareils à cadran dépasse considérablement le nombre des courants exigés par les appareils de la première classe.

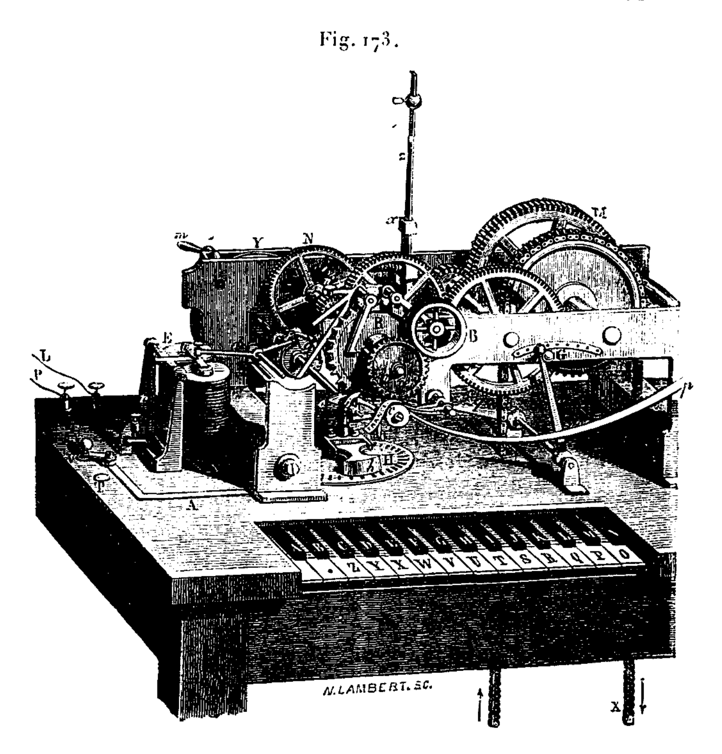
15. L'appareil Hughes est le type des appareils imprimeurs à mouvement synchronique. On peut expliquer de la manière suivante le principe sur lequel il est fondé.

Deux roues, appelées *roues des types,* pourvues de lettres sur leur contour et placées l'une à la station qui transmet et l'autre à la station qui reçoit, tournent avec la même vitesse ; elles sont en outre disposées de telle sorte que la même lettre de chaque roue se présente au même instant devant un intervalle vide ou *blanc* qui sert de point de repère. Le repère du récepteur se trouve en face d'un petit cylindre portant une bande de papier. Au moment où un courant arrive au récepteur, la palette d'un électro-aimant se dégage et soulève la bande de papier qui vient frapper le contour de la roue des types ; ce qui détermine l'impression d'une lettre, sans que la roue s'arrête ou soit sensiblement retardée dans sa rotation. Le papier retombe alors et s'avance de l'intervalle d'une lettre, entraîné par un mouvement d'horlogerie ; la palette est remise en place sur l'électro-aimant et tout est préparé pour l'impression d'une autre lettre. La lettre imprimée est évidemment la lettre de la roue des types qui se trouve en face du cylindre et du papier au moment où le courant arrive dans le récepteur. D'autre part, le transmetteur est muni d'une série de touches analogues aux touches d'un piano et portant inscrites sur leurs faces les lettres de l'alphabet. Ces touches et la roue des types de la station de départ sont reliées entre elles de telle sorte que l'abaissement de la touche A détermine l'émission d'un courant unique, au moment précis où la lettre A portée par la roue passe devant le repère. Comme le courant met un

temps inappréciable pour atteindre la station correspondante, il soulève la bande de papier du récepteur au moment même où la lettre A de la roue des types à la station d'arrivée, passe devant le repère. C'est donc la lettre A qui s'imprime à cette station.

Si l'employé abaisse maintenant la touche N, la roue des types à la

Fig. 173.



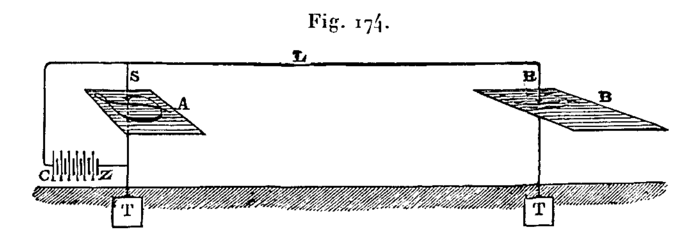
station de départ produit l'émission d'un courant sur la ligne au moment même où la lettre N est en face de son repère; au même instant, à la station d'arrivée, la lettre N de la roue des types se trouve en face du papier et du cylindre, et l'impression de cette lettre est par suite effectuée. Cet effet peut se reproduire indéfiniment pour un nombre quelconque de lettres, tant que les deux roues tournent avec la même vitesse. Chacune de ces roues est entraînée par un mouvement d'horlogerie, et pour maintenir à très peu près la

vitesse constante, on dispose un balancier qui vibre avec une extrême rapidité et gouverne un régulateur à frottement relié à la roue des types. S'il se produit dans le mouvement des roues la discordance la plus légère, elle est corrigée par chacun des courants émis. Chaque fois que le papier se soulève pour l'impression d'une lettre, le mouvement de la roue est automatiquement accéléré s'il y a retard, ou avancé dans le cas contraire. A cet effet, à chaque impression, une petite came s'engage entre les dents d'une roue dentée, montée sur le même axe que la roue des types et tournant avec elle. Cette roue satellite n'est pas calée invariablement sur l'axe, mais simplement maintenue dans sa position par frottement; on peut donc modifier cette position sans troubler sensiblement la vitesse du mouvement d'horlogerie. L'appareil Hughes est le meilleur des appareils imprimeurs qui ait été construit jusqu'à présent. Il présente ce grand avantage de n'exiger qu'un seul courant pour l'impression de chaque lettre. Nous donnons ici une vue en perspective du modèle construit en premier lieu.

16. Les appareils télégraphiques de Bakewell et de Caselli, qui fournissent le fac-simile des dépêches transmises, exigent des mouvements synchroniques aux deux extrémités de la ligne. Le principe sur lequel ces appareils sont fondés est le suivant :

La dépêche est écrite avec de l'encre ordinaire sur une feuille de

Fig. 174.



papier A, recouverte d'une mince feuille d'étain (*fig.* 174). A la station correspondante, on dispose une feuille de papier préparée à l'aide d'un procédé chimique, et sur laquelle un style R trace une marque visible lorsqu'un courant traverse le papier en s'écoulant du style vers la terre. Cette marque est semblable à celle qu'on

obtient dans l'instrument de Bain. Les styles S et R, dont les mouvements doivent être parfaitement synchroniques, sont promenés sur la surface des feuilles A et B en décrivant une série de lignes parallèles équidistantes. Comme l'indique la figure, une pile communique avec la feuille recouverte d'étain, la ligne L et la terre. Quand le style S est en contact avec l'étain, la pile est mise en court circuit à travers ce métal ; aucun courant appréciable n'atteint B et le style R ne fait aucune marque; mais quand S rencontre un caractère écrit sur A, la pile cesse d'être en court circuit parce que l'encre est isolante et le courant se répand sur L; tant que le style S repose sur l'encre et demeure isolé de la feuille A, un trait est tracé par le style R sur l'autre feuille.

On comprend aisément que l'impression effectuée en B doit être une copie de l'écriture originale aussi exacte que peuvent la reproduire une série de traits déliés ou de hachures, substituée au dessin continu de la lettre (*fig.* 175).

Fig. 175.



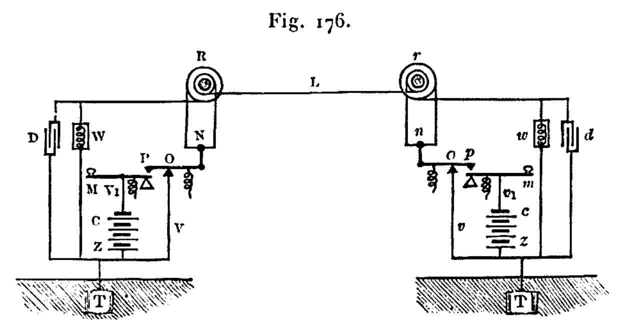
Le synchronisme de l'appareil Caselli est obtenu au moyen d'un pendule installé à chacune des deux stations; à chaque oscillation du pendule, le style trace un trait sur le papier. Chacun des pendules gouverne le mouvement de l'autre à l'aide d'un courant qu'il envoie à la station de réception, à travers un circuit spécial temporairement relié à la ligne.

17. A l'aide de diverses combinaisons d'appareils différentiels, on peut envoyer des dépêches dans les deux sens à la fois sur une même ligne. En réalité, les courants expédiés des deux stations ne traversent pas la ligne en même temps dans deux sens opposés; mais leur effet sur chacun des appareils récepteurs est précisément identique à celui qu'on obtiendrait si la ligne n'était parcourue que par des courants de même sens.

Supposons que les communications soient établies comme l'indique la *fig.* 176. R et *r* représentent deux relais formés l'un et l'autre de deux circuits capables de produire la même intensité d'aimantation sur le noyau quand des courants de même intensité traversent les deux circuits. Si deux courants d'égale intensité circulent en sens contraire dans chacun de ces circuits, le noyau n'est ni aimanté ni désaimanté. M et *m* sont deux manipulateurs Morse construits de telle sorte que la ligne est toujours en communication soit avec la terre, soit avec la pile, ou (pendant un temps très court et pendant le jeu du manipulateur) avec toutes les deux à la fois.

Quand la touche M n'est pas abaissée, il existe une communica-

Fig. 176.



tion non interrompue entre la ligne et la terre par la bobine intérieure du relais, le contact O et le fil V. La ligne communique encore avec la terre par une autre voie à partir du point N, c'est-à-dire par la bobine extérieure du relais et la bobine de résistance W. Le condensateur D est, comme on le voit, relié à cette section du circuit.

Quand la touche M est abaissée, il se fait en P un contact qui pendant un instant met la pile CZ en court circuit à travers les fils V_1 et V; mais, aussitôt après, le contact étant rompu en O, la pile CZ est mise en communication avec N et par suite avec deux circuits, l'un conduisant le courant par la branche intérieure du relais à la ligne et à la station correspondante, et l'autre conduisant le courant par la branche extérieure du relais à la résistance W et à la terre de la station qui transmet.

On prend pour la résistance W la résistance de la ligne L, augmentée de celle de la partie du circuit qui réunit la ligne et la terre à la station correspondante; la capacité du condensateur D est choisie de telle sorte que W et D représentent une ligne artificielle équivalente sous tous les rapports à la ligne réelle.

Les positions respectives des manipulateurs M et *m* présentent neuf cas différents :

1° M est abaissé et *m* est dans sa position normale, c'est-à-dire sans contact avec la pile. La pile CZ envoie un courant de même intensité dans chacune des bobines de R, sur lequel aucun effet n'est produit; car les courants circulent en sens contraires. Celui de ces courants qui passe sur la ligne L traverse la bobine intérieure de *r* et se rend à la terre à travers *o*: le relais *r* fonctionne et fournit un signal.

2° M est abaissé, ainsi que *m*. Les courants que les deux piles envoient sur la ligne se neutralisent; mais chaque pile envoie un courant à travers la bobine extérieure de son propre relais; les deux relais fonctionnent et des signaux sont formés aux deux stations. A chacune des stations le courant dirigé à travers la bobine extérieure du relais a même intensité que le courant envoyé par la pile à travers la ligne et la bobine intérieure du relais de l'autre station.

3° *m* est abaissé et M est dans sa position normale. Ce cas est le même que le premier; un signal est fourni par le relais R.

4° Les manipulateurs sont l'un et l'autre dans leur position normale. Dans ce cas les deux piles sont hors du circuit de la ligne. Aucun signal n'est fourni ni par l'un ni par l'autre relais.

5° M et *m* sont tous deux dans une position intermédiaire telle que le contact a lieu en P et *p* sans être rompu en O et *o*. Aucun signal n'est produit ni à l'une ni à l'autre station.

6° et 7° L'un des manipulateurs est dans cette position intermédiaire et l'autre est dans sa position normale. Aucun signal n'est produit ni à l'une ni à l'autre station.

8° Le manipulateur M est dans la position intermédiaire et *m* est abaissé. Le courant produit par *cz* n'est pas altéré et le signal est reçu par l'intermédiaire de la bobine intérieure de R.

9° Le manipulateur *m* est dans la position intermédiaire et M est

abaissé. Ce cas est le même que le précédent; un signal est reçu par l'intermédiaire de la bobine intérieure de *r*.

Dans tous les cas, l'effet produit sur les relais est tel que, si *m* est abaissé, R reçoit un signal, et que, si M est abaissé, *r* reçoit un signal.

La disposition qu'on vient d'indiquer est une modification de celle imaginée par MM. Siemens et Frischen; elle est due à un ingénieur américain, M. Stearns.

Suivant M. Stearns, il est avantageux d'introduire dans le circuit deux bobines de résistance en V et V_1; on prend pour V la résistance V_1 augmentée de la résistance de la pile, et pour V_1 une résistance suffisamment grande pour empêcher la polarisation de la pile à l'instant où elle se trouve momentanément mise en court circuit à travers V et V_1.

En mettant la pile en court circuit, M. Stearns évite l'isolement du point N au moment où le manipulateur M est dans sa position intermédiaire. Si N est isolé, le courant reçu traverse les deux bobines du relais et se rend à la terre à travers la résistance W. Au premier abord, cette dernière disposition, qui était celle adoptée par MM. Siemens et Frischen, semble parfaite; car, dans ce système différentiel, l'intensité du courant devient deux fois plus petite puisque la résistance est doublée, et en même temps il agit sur le relais avec une force double par unité de courant. Ce raisonnement ne tient pas compte de l'action inductive retardatrice (Chap. XXIII) qui résulte de l'allongement artificiel de la ligne. Dans toutes les positions du manipulateur, M. Stearns envoie des signaux sur une ligne de longueur et de capacité constantes.

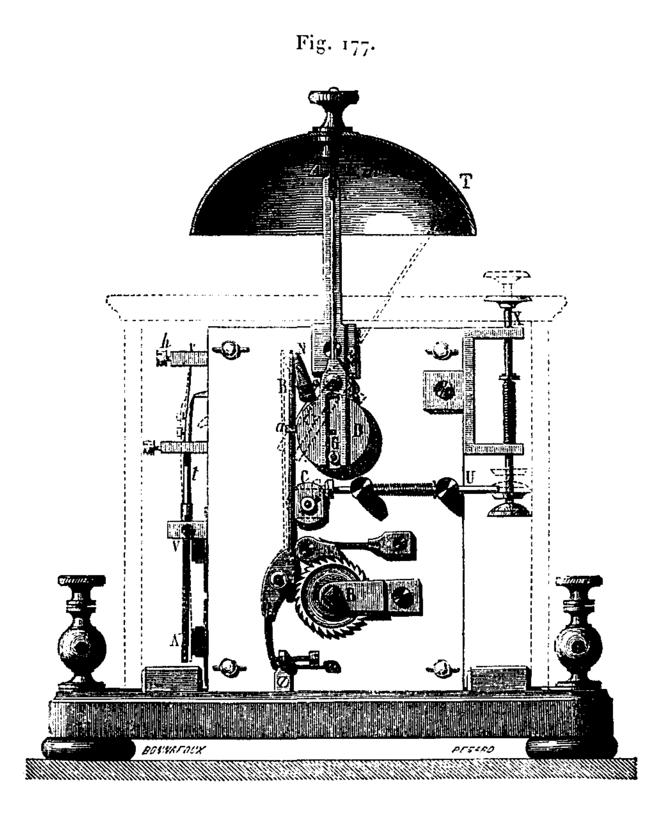
SONNERIES.

18. Les sonneries forment dans la série des appareils télégraphiques une catégorie spéciale. Outre les appareils à timbre que nous avons déjà décrits et dans lesquels un coup est frappé par le marteau à chaque émission de courant, il y a deux autres espèces de sonneries électriques.

Dans les sonneries du premier genre, le marteau est sollicité par un poids et par un mouvement d'horlogerie. Tant qu'un cliquet le

retient, ce mouvement d'horlogerie demeure en repos; mais il entre en marche et le marteau frappe sur le timbre dès que le cliquet est repoussé par l'armature d'un électro-aimant soumis à l'action du courant envoyé. Aussi longtemps que le courant passe, la sonnerie agit en même temps que le poids descend. La *fig.* 177 représente

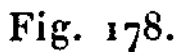
Fig. 177.

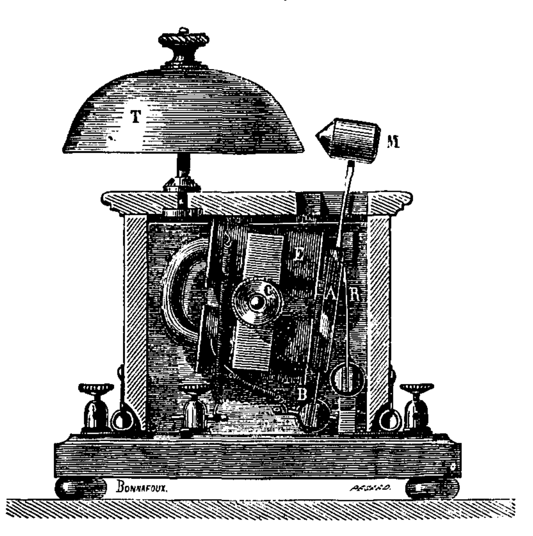


une sonnerie à mouvement d'horlogerie : le mécanisme d'horlogerie est composé de trois mobiles dont le dernier porte extérieurement un disque D muni d'une cheville G qui constitue une sorte d'excentrique destinée à réagir sur le marteau *m*.

Dans les sonneries du second genre, le marteau est fixé à la palette d'un électro-aimant et est pourvu d'un contact analogue

à celui que présente la bobine de Ruhmkorff. Lorsque la palette est attirée, le marteau frappe sur le timbre; en même temps le contact de pile est rompu et, le courant cessant alors de passer, la palette revient à sa position normale. Un nouveau contact a lieu; le marteau frappe de nouveau sur le timbre. Cet effet est reproduit tant qu'un courant est envoyé par la station qui appelle. Les sonneries de ce dernier genre qu'on désigne quelquefois sous


Fig. 178.



le nom de sonneries à *trembleur*, sont les plus commodes; ce sont celles que l'on adopte dans les maisons particulières et les hôtels. La *fig.* 178 représente une sonnerie à trembleur. L'armature A de l'électro-aimant E qui est fixée à une lame de ressort B appuie contre une seconde lame R reliée à la pile. Cette armature porte la tige du marteau M qui frappe sur le timbre T.

Les sonneries électriques peuvent rendre de grands services aux personnes invalides, dans les hôpitaux ou les maisons particulières. Pour mettre en action la sonnerie électrique, il suffit d'établir un contact en un point quelconque du circuit; ce contact peut être

produit au moyen d'une légère pression exercée sur le bouton d'une sorte de boîte que le malade tient à la main dans son lit; il y peut prendre une position quelconque sans cesser d'avoir la sonnerie à sa disposition. Les sonneries électriques sont aussi employées dans le service des chemins de fer pour indiquer la position des disques protecteurs : elles servent dans toutes les stations télégraphiques à éveiller l'attention des agents.

CHAPITRE XXIII.

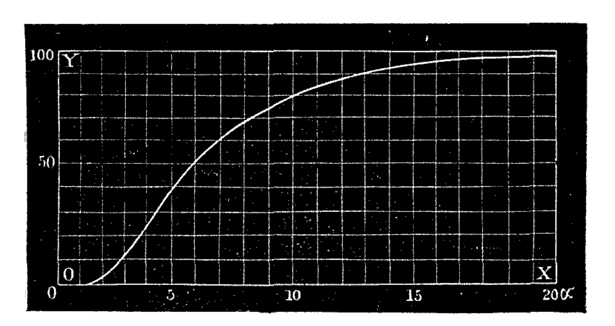
VITESSE DES SIGNAUX.

1. On ne saurait dire rigoureusement que l'électricité a une vitesse de transmission ou de propagation. Sans doute, quand un point d'un circuit est mis en communication avec une source, les effets électriques ne se manifestent sur les divers points de ce circuit qu'après un intervalle de temps appréciable; par exemple, quand un signal est envoyé à travers le câble Atlantique, il ne se fait pas sentir à Terre-Neuve au moment même où le manipulateur est abaissé en Irlande. En divisant la distance de ces deux points par l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'émission et la réception du signal, on obtient un nombre qu'on peut appeler la vitesse avec laquelle ce signal particulier a été transmis ou plus simplement la vitesse de ce signal. On pourrait même l'appeler la vitesse avec laquelle une certaine quantité d'électricité a traversé le câble. Mais ce nombre n'exprime pas la vitesse propre ou caractéristique de l'électricité; car, dans des circonstances différentes, la même quantité d'électricité franchira la même distance avec des vitesses absolument différentes.

Environ $0^s,2$ après que le contact a été établi en Irlande, aucun effet ne peut encore être observé à Terre-Neuve, même avec l'instrument le plus délicat. Au bout de $0^s,4$ l'intensité du courant reçu est à peu près les $\frac{7}{100}$ de l'intensité maximum du courant permanent qui s'établit définitivement dans toutes les parties du circuit. L'intensité augmente peu à peu; 1^s après que le contact a été établi, cette intensité atteint presque la moitié de sa valeur finale, et au bout de 3^s elle est parvenue à cette valeur finale maximum.

Pendant toute cette période de temps, le courant afflue dans le câble, par l'extrémité reliée à la pile, avec son maximum d'intensité. La vitesse avec laquelle le courant circule n'a donc pas, même dans ce cas particulier, une signification précise; le courant n'arrive pas à destination tout d'un coup comme un boulet de canon; mais son intensité grandit progressivement en passant d'un minimum à un maximum. Le temps nécessaire au courant pour produire sur diverses lignes un effet électrique semblable et déterminé est proportionnel à la capacité de l'unité de longueur du conducteur, à sa résistance par unité de longueur et au carré de la distance comprise entre la station qui transmet et celle qui reçoit. La courbe de la *fig.* 179 représente la loi d'accroissement des in-

Fig. 179.



tensités des courants reçus à la station d'arrivée; cette loi est la même sur toutes les lignes. On construit de la manière suivante la courbe ci-contre qui est appelée *courbe d'arrivée du courant*. Les ordonnées parallèles à OY représentent les intensités du courant, l'intensité maximum ou constante du courant qui traverse le câble après l'établissement de l'équilibre électrique étant désignée par 100. Les abscisses ou les lignes parallèles à OX, comprises entre l'axe OY et la courbe, représentent les intervalles de temps comptés à partir du premier contact et exprimés au moyen d'une unité α, différente pour des circuits différents, mais constante pour un même circuit. Pour une ligne uniforme de longueur l, de résistancet ρ et de capacité c par unité de longueur, la valeur de l'unité

de temps α est exprimée en secondes par la formule suivante où $\log_\varepsilon\left(\sqrt[10]{10}\right)$ représente le logarithme vulgaire de $\sqrt[10]{10}$;

$$(1) \qquad \alpha = \frac{c\rho l^2}{\pi^2} \log_\varepsilon\left(\sqrt[10]{10}\right) = 0{,}02332 . c\rho l^2 .$$

Dans cette expression, les quantités sont exprimées en mesures absolues du système gramme-mètre-seconde. Soient c_1 la capacité estimée en microfarads par mille de longueur, ρ_1 la résistance en ohms par mille et l_1 la longueur totale du conducteur en milles, l'expression (1) devient

$$(2) \qquad \alpha = 0{,}02332 . 10^{-6} . c_1 \rho_1 l_1^2 .$$

Pour le câble atlantique français, on a

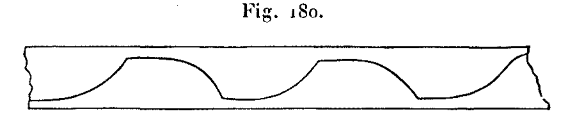
$$c_1 = 0{,}43, \quad \rho_1 = 2{,}93, \quad l_1 = 2584,$$

ce qui donne pour la valeur de α

$$\alpha = 0^s{,}196.$$

Si l'on construit, au moyen de l'unité correspondante α, les courbes d'arrivée du courant pour différentes lignes, on reconnaît que toutes ces courbes sont semblables. La même courbe représente aussi la loi suivant laquelle l'intensité du courant s'affaiblit et s'éteint à la station d'arrivée lorsque, à la station de départ, le fil de ligne est mis à la terre. Si l'on produit à la station qui transmet une succession de contacts alternatifs avec la pile et avec la terre, prolongés chacun pendant un temps égal à environ $25\,\alpha$, l'intensité de chaque courant reçu éprouve la série des variations indiquées sur la *fig.* 180. Chaque groupe de deux courbes repré-

Fig. 180.



sente une courbe complète d'arrivée, flux et reflux de la charge électrique du courant. Nous aurons à distinguer la courbe du flux et celle du reflux.

La table ci-dessous donne les valeurs des ordonnées, c'est-à-dire des intensités du courant correspondant à divers sous-multiples et multiples de α, l'intensité maximum étant représentée par 100.

TEMPS exprimé en unités α.	INTENSITÉ du courant exprimée en centièmes de l'intensité maximum.	TEMPS exprimé en unités α.	INTENSITÉ du courant exprimée en centièmes de l'intensité maximum.	TEMPS exprimé en unités α.	INTENSITÉ du courant exprimée en centièmes de l'intensité maximum.
0,4	0,0000000271	1,9	1,904356	6,2	52,68501
0,5	0,0000051452	2,0	2,460812	6,4	54,73314
0,55	0,0000033639	2,1	3,09969	6,6	56,70294
0,60	0,000016714	2,2	3,81846	6,8	58,9502
0,62	0,000029252	2,3	4,61560	7,0	60,41164
0,64	0,000049412	2,4	5,48661	7,2	62,15439
0,66	0,000080817	2,5	6,42695	7,4	63,82523
0,68	0,00012835	2,6	7,43163	7,6	65,42636
0,70	0,00019845	2,7	8,49536	7,8	66,95995
0,72	0,00029937	2,8	9,61264	8,0	68,42832
0,74	0,00044152	2,9	10,77797	8,5	71,82887
0,76	0,00063776	3,0	11,98582	9,0	74,87172
0,78	0,00090371	3,1	13,23087	9,5	77,59133
0,80	0,00125804	3,2	14,50800	10,0	80,02000
0,82	0,00172272	3,3	15,81233	10;5	82,18760
0,84	0,00232333	3,4	17,13921	11	84,12139
0,86	0,00308919	3,5	18,48434	12	87,38402
0,88	0,00405358	3,6	19,84366	13	89,97752
0,90	0,00525387	3,7	21,21342	14	92,03836
0,92	0,00673158	3,8	22,59017	15	93,67565
0,94	0,00853247	3,9	23,97071	16	94,97631
0,96	0,01070646	4,0	25,35217	17	96,00951
0,98	0,01330764	4,2	28,10757	18	96,83023
1,00	0,01639420	4,4	30,83807	19	97,48215
1,1	0,04140636	4,6	33,52902	20	98,00000
1,2	0,08927585	4,8	36,16892	21	98,41134
1,3	0,1704802	5,0	38,74814	22	98,73809
1,4	0,2959955	5,2	41,26032	23	98,99763
1,5	0,476336	5,4	43,70028	24	99.20379
1,6	0,720788	5,6	46,06449	25	99,36754
1,7	1,036905	5,8	48,35070		
1,8	1,430252	6,0	50,55770		

Quand la ligne est mise à la terre à la station qui transmet, avant l'établissement définitif du courant maximum, la courbe du reflux se superpose à la courbe du flux et il se produit une courbe dérivée, analogue à celle de la *fig.* 181, qui correspond au cas où la ligne communique avec la pile pendant 5α et est ensuite mise à la terre. Au bout d'un temps égal à 6α, compté à partir de l'instant du premier contact, l'intensité du courant sera

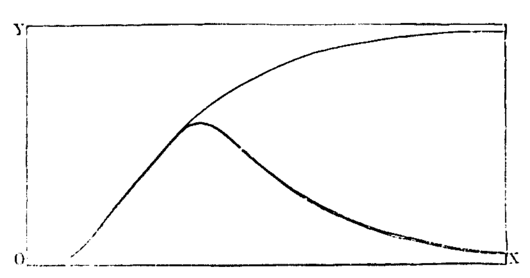
$$50,55770 - 0,01639 = 50,54131.$$

Au bout d'un temps égal à 7α, cette intensité devient

$$60,41164 - 2,46081 = 57,95083.$$

On peut de cette manière obtenir autant de points de la courbe

Fig. 181.



qu'on voudra et par suite la tracer dans toute son étendue. Si au bout d'un temps égal à 7α, la ligne est de nouveau mise en contact avec la pile, il se forme une troisième courbe qu'on peut obtenir en combinant la courbe primitive avec la première courbe dérivée ; en sorte qu'au bout d'un temps égal à 8α, l'intensité du courant serait

$$68,42822 - 11,98582 + 0,01639420.$$

On peut ainsi estimer l'effet dû à un nombre quelconque d'opérations.

2. Il suit de là qu'une série de contacts de durée égale et très courte, établis alternativement avec la pile et avec la terre à la station qui transmet, produit dans l'intensité du courant à la station

qui reçoit, une suite d'accroissements et de décroissements qui deviennent de plus en plus faibles à mesure que la durée des contacts diminue : l'intensité moyenne du courant sera moitié de l'intensité maximum du courant permanent. Lorsque les contacts successifs avec la pile et avec la terre sont de durée très courte par rapport à la valeur de α, aucune variation sensible ne peut être distinguée dans l'intensité du courant qui afflue à la station d'arrivée. A mesure que les contacts se prolongent, l'amplitude de la variation augmente. Le tableau suivant donne les valeurs de diverses amplitudes pour une suite de points ou de contacts d'égale durée avec la terre et avec la pile.

Durée d'un couple de contacts exprimée en fonction de l'unité α.	2,9	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10
Amplitude de la variation d'intensité du courant, exprimée en centièmes du courant maximum..	2,69	2,97	4,52	6,31	10,42	14,85	19,67	24,42	29,11	33,68

La théorie de la vitesse des signaux a été exposée pour la première fois par sir William Thomson, dans un mémoire lu devant la Société Royale le 24 mai 1855, publié dans les *Proceedings* et réimprimé dans le *Philosophical Magazine* en février 1856.

3. Les signaux émis sur les lignes terrestres ont une durée si longue par rapport à la valeur excessivement petite de α pour ces lignes, que dans toutes les circonstances ordinaires l'intensité du courant atteint presque son maximum et retombe à zéro, pendant la transmission de chaque point. La capacité en mesure électrostatique d'un fil de diamètre d et de longueur l, suspendu à une hauteur h au-dessus d'un terrain plan et éloigné de tout autre conducteur, est

$$c = \frac{l}{2 \log \frac{4h}{d}}. \qquad (3)$$

En faisant $h = 3^m$ et $d = 0^m,004$, on trouve

$$c = 0,062\, l$$

ou, en mesure électromagnétique absolue,

$$C = \frac{0,062}{(28,8 \times 10^9)^2} l,$$

c'est-à-dire environ 0,008 microfarad par kilomètre. L'expérience conduit à penser que la capacité réelle du kilomètre de ligne est à peu près double de cette valeur ou même un peu plus grande à cause de l'induction qui se produit entre le fil et les poteaux ou les isolateurs. En supposant que la capacité réelle du kilomètre soit 0,02 microfarad, c'est-à-dire environ deux fois et demie la valeur indiquée plus haut, et que la résistance du kilomètre de fil de $0^m,004$ soit 10 ohms, on a, pour une ligne de 560^{km} de longueur,

$$\alpha = 0^s,00126.$$

Cette valeur est tellement petite que, même avec une durée de 20α pour chaque contact et par suite de 40α pour chaque point, la formation du point n'exigerait que $0^s,05$, c'est-à-dire que l'on pourrait former 20 points en une seconde; et, pendant la transmission de chacun de ces points, l'intensité du courant s'élèverait presque à son maximum et descendrait presque à zéro. Dans ces conditions, la vitesse de transmission serait d'environ 80 mots par minute, sans que l'effet de ce qu'on appelle *le retard* se fasse sentir et diminue l'amplitude des variations d'intensité du courant reçu.

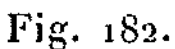
Les appareils destinés au service des lignes terrestres sont donc invariablement construits dans l'hypothèse que l'intensité du courant reçu s'élève et descende, pour chaque signal, entre deux limites qui représentent une fraction considérable de son intensité maximum. Le ressort attaché à la palette de l'électro-aimant est réglé de telle sorte que, pour une certaine intensité du courant reçu, la palette se tienne élevée, et que, pour une autre intensité différant peu de la précédente, elle s'abaisse. Si l'on veut que le fonctionnement d'un pareil instrument soit sûr, il faut que le courant reçu s'élève beaucoup au-dessus de cette dernière intensité et

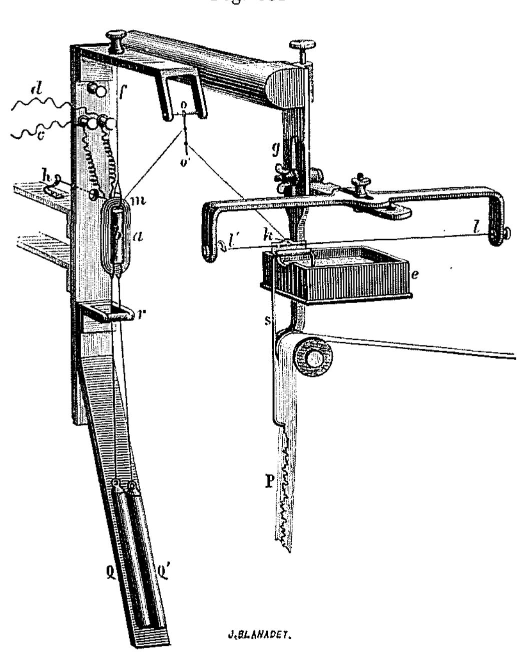
descende beaucoup au-dessous de la première. Ces conditions sont réalisées, même avec une vitesse de 100 mots par minute, sur le transmetteur automatique de Wheatstone fonctionnant entre Londres et Édimbourg.

4. Sur les lignes sous-marines, la condition d'une variation régulière et de grande amplitude dans l'intensité du courant reçu limite notablement la vitesse de transmission. Un intervalle de temps égal à 40α correspond, pour le câble atlantique français, à environ 8^s, et il faudrait 2^m pour transmettre un mot si cet intervalle de temps de 8^s était nécessaire pour chaque point; en réalité on peut envoyer, par ce câble, de 15 à 17 mots par minute. La durée d'un point à la vitesse de 15 mots par minute est d'environ $0^s,27$ ou à peu près $1,38\alpha$, puisque la valeur de α est, pour ce câble, de $0^s,196$. Sans doute un certain nombre de points ne produisent pas, dans l'intensité du courant reçu, une variation qui dépasse 0,001 de l'intensité du courant permanent. La théorie des courants superposés nous montre que l'effet d'un point quelconque, positif ou négatif, est influencé par les vingt ou trente signaux qui le précèdent, et il en résulte qu'une transmission même parfaitement régulière amène des résultats irréguliers à la station de réception. Pour recevoir des signaux de cette nature, on ne peut employer une combinaison d'armatures ou tout autre appareil qui se mette en mouvement sous l'action d'un courant d'intensité déterminée; il faut nécessairement un instrument qui puisse suivre et indiquer ou enregistrer tout changement produit dans l'intensité du courant reçu. Grâce à Sir William Thomson, dont le galvanomètre à miroir satisfait entièrement à cette condition, la télégraphie sous-marine est devenue pratique et susceptible d'une exploitation régulière. La tache lumineuse se promène sur l'échelle, en traduisant à l'œil chaque changement qui survient dans l'intensité du courant, et les employés réussissent, au bout d'un court apprentissage, à interpréter les mouvements en apparence irréguliers de cette tache. La production du premier point jette la tache lumineuse presque à l'extrémité de l'échelle; le second point la porte un peu plus loin; le troisième et le quatrième point déterminent un mouvement à peine appréciable; mais l'employé sait par expérience que ces quatre

effets très différents indiquent quatre points, transmis tous d'une manière précisément semblable par son correspondant.

5. Le siphon enregistreur de Sir William Thomson trace effectivement sur le papier les courbes que nous avons appris à construire théoriquement. Un tube de verre de calibre très fin projette


Fig. 182.



de l'encre sur une bande de papier qui se déroule d'un mouvement uniforme. La pointe du tube éprouve vers la droite ou vers la gauche un petit déplacement proportionnel, à chaque instant, à l'intensité du courant reçu et par conséquent les signaux sont figurés sur le papier par des courbes sinueuses dont les inflexions représentent à chaque instant cette intensité. Le tube reçoit ce mouvement, par l'intermédiaire des fils k, m et du levier oo', d'une bobine a très légère et mobile, placée entre les pôles d'un très

fort électro-aimant; ce dernier n'est pas représenté sur la figure.

La bobine est enroulée autour d'un noyau *b* de fer doux; elle oscille autour d'un axe vertical et s'oriente dans une direction déterminée par la tension de deux fils portant deux poids Q et Q' mobiles sur un plan incliné; la bobine ne peut en effet tourner sur elle-même sans relever les poids d'une petite quantité. Le courant reçu traverse cette bobine en arrivant par les fils *c* et *d*; la bobine tourne alors autour de son axe dans le champ magnétique de l'électro-aimant, et dévie, dans un sens ou dans l'autre, d'un angle plus ou moins grand, suivant le signe et l'intensité du courant reçu. Le champ magnétique développé autour de la bobine est très énergique et rigoureusement uniforme, ce qui donne à l'appareil une grande sensibilité. Le tube de verre S, recourbé en siphon, est attaché au fil *ll'*; sa petite branche plonge dans un réservoir d'encre *e* et l'extrémité de sa longue branche se trouve en face du papier P. Le curseur à coulisse *g* permet de retirer le siphon du réservoir, et le ressort *h* maintient tendus les fils *k* et *m*. On règle la force directrice des fils en faisant varier la position de l'étrier *r* sur lequel ils s'appuient.

Si l'on insère un shunt sur la bobine, de manière à former un circuit relativement court dans lequel puisse se répandre le courant induit par le mouvement propre de la bobine, l'induction électromagnétique de l'aimant sur la bobine tend à éteindre certaines oscillations rapides étrangères aux signaux. Une partie du courant reçu se perd à travers le shunt; mais celui-ci est rarement nécessaire, car la capacité des câbles qui communiquent avec la bobine est telle qu'une induction très sensible a lieu même sans le shunt.

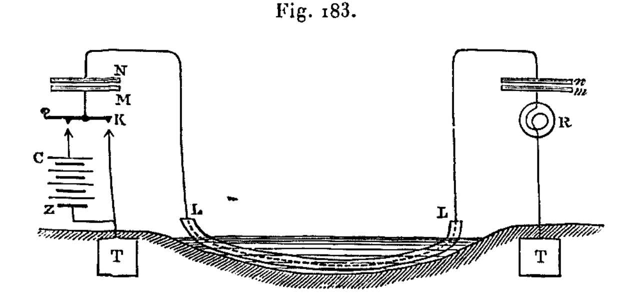
L'encre du réservoir est électrisée par une machine d'induction semblable à celle dont le principe a été exposé au Chapitre XIX, nº 1; par suite de cette électrisation, l'encre est projetée, sous forme de fines gouttelettes, sur la bande de papier électrisée en sens contraire.

6. Si la pointe du siphon enregistreur se déplaçait entre des limites proportionnelles à l'intensité du courant reçu, il est clair que des signaux ordinaires exigeant seulement $\frac{1}{1000}$ de l'intensité

du courant maximum occuperaient $\frac{1}{1000}$ de la largeur du papier, et par suite ne pourraient devenir lisibles sur les bandes étroites communément employées. Ces signaux sont lisibles sur le galvanomètre à miroir, parce que la tache lumineuse peut se déplacer sur une longueur de 1^{m} ou même davantage; mais la largeur ordinaire des bandes dans un instrument enregistreur est de 18^{mm}. M. Varley a imaginé une méthode de transmission, au moyen de condensateurs, qui permet de maintenir la tache lumineuse du galvanomètre à miroir sur une portion restreinte de l'échelle et la pointe du siphon enregistreur entre les bords d'une étroite bande de papier.

La ligne L est mise (*fig.* 183) en communication avec les arma-

Fig. 183.



tures isolées N et n de deux condensateurs de grande dimension. La seconde armature M du condensateur placé à la station qui transmet est reliée à un manipulateur K, au moyen duquel elle peut être mise en communication, soit avec la pile CZ, soit avec la terre; l'armature m est en communication permanente avec la terre par l'intermédiaire du récepteur R.

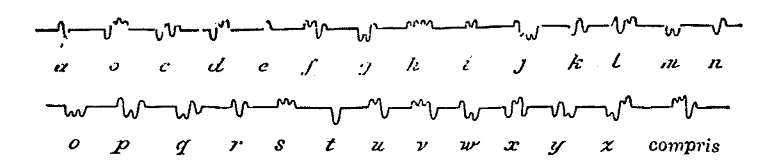
Si, par l'abaissement de la touche du manipulateur K, l'armature M communique avec le pôle positif, N devient négatif par induction; un courant se répand sur la ligne de N à n; n devient donc positif; par suite m devient négatif par induction, et lorsque m prend une charge négative, un courant de courte durée passe de m à T à travers R, en produisant la déviation de la tache dans un sens déterminé, c'est-à-dire le signal demandé. Le courant qui traverse R naît brusquement; il est très faible et s'éteindrait gra-

duellement, même si l'armature M n'était pas mise à la terre; toutefois la chute d'intensité de ce courant est accélérée si l'on relève le manipulateur pour mettre M à la terre. Un signal négatif est produit quand M est mis en communication avec le pôle zinc de la pile au lieu du pôle cuivre.

Dans ce système, l'électricité entre dans le câble et en sort seulement par voie d'induction; la distribution de la charge dans le câble est modifiée à chaque signal. Le courant qui traverse le récepteur R ne dépasse jamais en intensité le courant produit par l'émission du premier signal.

La *fig.* 184 représente l'alphabet dont on fait usage avec ce système de transmission.

Fig. 184.



La *fig.* 185 représente une dépêche transmise dans ce système et reçue par le siphon enregistreur.

Fig. 185.



Le système de M. Varley présente un autre avantage; c'est qu'aucun courant terrestre permanent ne peut circuler dans le câble puisque la ligne ne communique en aucun point avec le sol. Un changement subit du potentiel de la terre à l'une ou à l'autre station produirait sans doute un courant par induction; mais les changements brusques de potentiel sont beaucoup plus rares que les changements qui s'effectuent lentement, et ceux-ci, quelque

considérables qu'ils soient, sont absolument sans action sur le câble, par suite de la présence des condensateurs.

7. Le temps nécessaire à la production de chaque effet électrique est proportionnel à α, c'est-à-dire au produit $c\rho l^2$, et, par suite, quel que soit l'instrument employé pour recevoir ou enregistrer les dépêches, la vitesse de transmission est inversement proportionnelle au produit $c\rho l^2$; si l'on considère des câbles de même construction, c et ρ étant les mêmes, la vitesse sera inversement proportionnelle au carré de la longueur.

La vitesse de la transmission varie encore, dans un rapport considérable, avec la nature de l'opération électrique nécessaire pour le fonctionnement de l'appareil. Ainsi le récepteur Morse exige, pour la formation des points, un intervalle de temps probablement égal à 15 α ou 20 α; il est donc à peu près 14 fois plus lent que le galvanomètre à miroir, pour lequel les points demandent un temps égal à α ou 1,2 α. La vitesse du siphon enregistreur est à peu près la même que celle du miroir.

La vitesse de transmission d'un câble dépend du poids par mille p du conducteur de cuivre et du poids par mille P de l'enveloppe de gutta-percha. On peut la calculer au moyen de la formule suivante où l représente la longueur du câble en milles ; il s'agit d'ailleurs de la vitesse de transmission au miroir et cette vitesse V est exprimée par le nombre de mots de 5 lettres transmis en une minute : p et P sont évalués en kilogrammes.

$$V = 0{,}5126\,p\,\frac{\log(156{,}4\,p + 1066\,P) - \log(144\,p)}{l^2} \times 10^6.$$

Si l'on fait usage de la composition de Willoughby Smith au lieu de gutta-percha, il faut remplacer le coefficient 0,5126 par 0,607.

Si l'on fait usage de la composition Hooper, de capacité spécifique inductive égale à 3,33 et de densité telle qu'elle pèse par mille $\frac{D^2 - d^2}{888}$ kilogrammes, la formule précédente devient

$$V = 0{,}651\,p\,\frac{\log(156{,}4\,p + 888\,P) - \log(144\,p)}{l^2} \times 10^6.$$

Cette formule donne 13 mots par minute pour la vitesse de transmission sur le câble atlantique français ; on a pu transmettre quelquefois 17 mots par minute sur ce câble. Si l'on se sert d'appareils Morse, il faut diviser par 14 les résultats fournis par les formules.

On remarquera que, si le rapport entre les poids par mille du diélectrique et du conducteur est maintenu constant, les vitesses de transmission sont proportionnelles aux masses de matières employées.

CHAPITRE XXIV.

LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES.

1. Une ligne télégraphique est un fil isolé qui s'étend d'une station à l'autre. Pour les lignes terrestres, c'est-à-dire établies en l'air, on emploie en général un fil de fer soutenu par des isolateurs en grès, porcelaine, verre ou ébonite, que supportent des poteaux en bois ou en fer. Quelquefois on se sert de conducteurs souterrains; ceux-ci sont ordinairement formés d'un fil de cuivre isolé avec de la gutta-percha ou du caoutchouc et protégé par une enveloppe de ruban de coton, par des tuyaux en plomb ou en fer, par des conduits en bois remplis de bitume ou encore par une armature de fil de fer. Les lignes sous-marines présentent invariablement un conducteur en cuivre, isolé avec de la gutta-percha ou une composition de caoutchouc; ce conducteur, avec sa gaine isolante, forme ce qu'on appelle *l'âme du câble*. L'âme est protégée par une enveloppe de chanvre ou de jute et recouverte de fils de fer ou d'acier disposés en hélice. Ceux-ci sont souvent recouverts eux-mêmes de chanvre et de goudron ou de quelque composé bitumineux. Il importe que le conducteur d'une ligne télégraphique ait peu de résistance et qu'il soit bien isolé. Plus la résistance de la ligne est petite, plus est faible la force électromotrice de la pile nécessaire pour la transmission; plus est faible aussi la perte correspondant à un isolement donné. Sur les lignes sous-marines, on augmente la vitesse de transmission ou le rendement du câble en

diminuant la résistance du conducteur. Un isolement défectueux ou une trop grande déperdition nécessite l'emploi de piles énergiques et un fréquent réglage des appareils récepteurs; il faut en effet les accorder avec les variations d'intensité des courants reçus, lesquelles résultent des variations de la résistance; un mauvais isolement augmente singulièrement encore la difficulté des essais électriques qui servent à déterminer la position d'une avarie sur la ligne. Les paragraphes qui suivent ont principalement pour objet de faire connaître les moyens adoptés dans la pratique pour obtenir tout à la fois une résistance modérée et un isolement considérable.

2. Le fil de fer employé pour les lignes terrestres a généralement, en Angleterre, un diamètre de $4^{mm},191$ (nº 8 de la jauge de Birmingham).

La table suivante indique les dimensions adoptées pour le conducteur. Les poids par kilomètre sont tirés des tables de Clark; il y a des différences considérables dans les poids donnés par les différents auteurs et je ne saurais répondre de l'exactitude d'aucune des tables qui existent.

Suivant M. Culley, le fil de $4^{mm},191$ de diamètre a une résistance de $10^{ohms},2$ par kilomètre, et le fil de $6^{mm},045$ de diamètre, une résistance de $4^{ohms},75$ par kilomètre. A ce point de vue les divers échantillons présentent de grandes différences. La résistance à la rupture d'un fil de fer de bonne qualité varie depuis 3150^{kg} par centimètre carré pour les fils de gros diamètre, par exemple ceux de $7^{mm},620$, jusqu'à 6300^{kg} par centimètre carré, pour les fils de $4^{mm},191$ ou d'un diamètre moindre. Suivant M. Culley, la charge de rupture du fil de $4^{mm},191$ est de 589^{kg} et ce poids correspond, d'après la table ci-dessous, à une charge de 5781^{kg} par centimètre carré.

Le fil de fer employé en télégraphie doit être galvanisé; il faut qu'on puisse l'enrouler sur lui-même et le dérouler sans qu'il se détériore; il faut encore qu'on puisse le plier quatre fois à angle droit, d'abord dans un sens et ensuite dans l'autre, en le maintenant dans un étau. Avant d'être employé, le fil est étiré à froid, jusqu'à ce qu'il ait subi un allongement de 2 pour 100; c'est ce

qu'on appelle l'*amortir*. Non seulement cette opération permet de découvrir les points défectueux du fil; mais encore elle le rend moins élastique et plus maniable. On le recouvre d'une couche de peinture ou de vernis aux endroits exposés à la fumée.

Sur les alignements droits, on plante de 16 à 13 poteaux par kilomètre; ce nombre est quelquefois réduit à 10 si la ligne ne doit pas porter plus de 4 fils. Sur les courbes de petit rayon, il faut planter jusqu'à 25 poteaux par kilomètre. Plus le nombre des poteaux est restreint, meilleur est l'isolement de la ligne. Si celle-ci est composée de 10 fils au plus, le diamètre des poteaux de bois doit être de $0^m,12$ au sommet; si le nombre des fils dépasse 10, le diamètre supérieur de ces poteaux doit être de $0^m,15$. Le mélèze créosoté est le meilleur bois qu'on puisse choisir; on carbonise, en les passant au feu, les pieds des poteaux pour empêcher qu'ils ne pourrissent, et on les goudronne quand ils sont bien secs. On peint la partie du poteau qui n'est pas enterrée.

DIAMÈTRE en millimètres.	POIDS par kilomètre en kilogrammes.	RÉSISTANCE par kilomètre en ohms (aux températures ordinaires).	TENSION en kilogrammes, correspondant à une charge de 1575^{kg} par centimètre carré	REMARQUES.
7,620	350,909	2,99	353,25	Dimensions utilisées aux Indes et sur quelques longues lignes d'Angleterre.
7,213	314,831	3,34	316,50	
6,045	220,692	4,75	222,25	
5,156	160,657	6,54	161,75	Dimension utilisée en Allemagne.
4,191	105,977	10,18	106,75	Dimension utilisée en Angleterre et en Allemagne.
4,000	100,000	10,00 (valeur communément adoptée en France.)	94,50	Dimension utilisée en France.
3,404	70,182	15,00	70,50	Dimension utilisée en Angleterre pour les petites lignes.
3,000	56,000	16,6	39,50	Dimension utilisée en France.

La distance entre les fils ne doit pas être inférieure à $0^m,30$ dans le sens vertical et à $0^m,40$ dans le sens horizontal, quand le nombre des poteaux est de 13 par kilomètre.

3. Aucune ligne ne saurait être isolée parfaitement. Sur les lignes terrestres il ne se produit pas de perte entre le fil et l'air; mais, à chaque poteau, il y a nécessairement une perte, si soignée que soit la construction de la ligne; en d'autres termes, il existe à chaque poteau une communication du fil avec la terre. La résistance de cette communication est très grande quand le fil est bien isolé; elle est faible quand l'isolement est défectueux.

Le fil est toujours séparé du poteau en bois par un *isolateur*, et l'isolement du fil dépend de la forme, de la nature et de l'état de ces isolateurs. Certaines sortes de verre opposent une résistance plus grande que toute autre matière connue au passage du courant à travers leur masse; malheureusement le verre satisfait imparfaitement aux conditions de l'isolement pour les lignes télégraphiques. C'est en effet par la surface des supports que s'échappe la plus grande partie de l'électricité perdue sur une ligne, et le verre est éminemment hygrométrique; une couche humide et conductrice le recouvre à peu près constamment. L'ébonite, sorte de caoutchouc vulcanisé et durci, possède une résistance d'isolement considérable et est peu hygrométrique; mais la pluie le pénètre aisément; aussi les isolateurs en ébonite sont-ils en général recouverts d'un abri fait avec quelque autre substance; la surface de l'ébonite se salit vite et s'écaille.

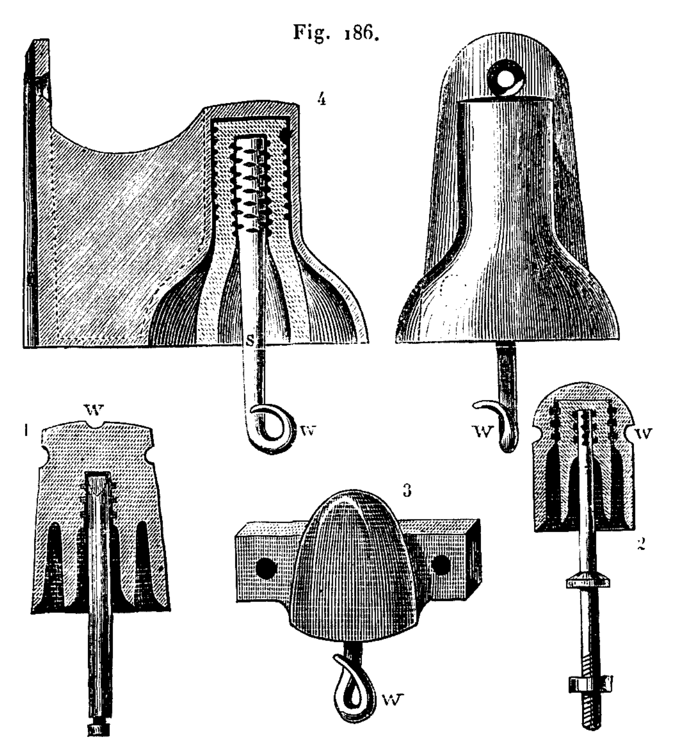
Certaines qualités de porcelaine isolent bien; la porcelaine n'est pas à beaucoup près aussi hygrométrique que le verre, et, quand sa surface est bien vernissée, la pluie glisse aisément sur elle. Le vernis qui forme le *glacé* de la porcelaine isole encore mieux que la matière même de la porcelaine: mais, dans certains échantillons, il se fendille avec le temps et n'est plus alors d'aucune utilité.

Le grès fournit des isolateurs excellents et à bon marché; son vernis ne se fendille pas; mais le grès n'a pas une résistance spécifique aussi grande que la porcelaine, dont la cuisson a été opérée à une haute température. Comme l'état de la surface est surtout important dans les isolateurs, la porcelaine et le grès sont les

substances préférées à toutes les autres; elles se maintiennent propres et ne se modifient pas avec le temps, quand elles sont bien choisies; les insectes ne viennent pas se loger dans leur intérieur.

L'isolateur a le plus souvent la forme d'une cloche ou de plusieurs cloches emboîtées l'une dans l'autre. Le modèle n° 1 de la *fig.* 186 représente l'isolateur à double cloche de Latimer Clark; le modèle n° 2 est l'isolateur Varley fait de deux pièces; le modèle n° 3 est l'isolateur à crochet, modèle très rudimentaire dont on

Fig. 186.



s'est beaucoup servi en France; enfin le modèle n° 4 est l'isolateur Siemens protégé et supporté par un chapeau en fer.

Les conditions qu'on doit s'attacher à remplir et qui déterminent la forme des isolateurs sont les suivantes :

1° Il faut que la couche conductrice qui peut se déposer sur

la surface de l'isolateur entre le fil et le poteau s'étende sur une longueur aussi grande que possible; car, toutes choses égales d'ailleurs, la résistance de cette couche croît proportionnellement à sa longueur. On réalise cette condition avec une série de cloches engagées l'une dans l'autre : l'électricité doit successivement contourner les surfaces intérieure et extérieure de chaque cloche avant de passer du fil au poteau.

2° Il faut que la largeur de la couche conductrice soit aussi petite que possible; dans ce but, on réduit le diamètre de l'isolateur autant que le comportent les autres conditions d'importance principale.

L'épaisseur de la couche conductrice dépend de conditions étrangères à l'isolateur; mais plus est grand le diamètre des cloches, plus est grande la section transversale de la couche conductrice, c'est-à-dire du double anneau d'humidité qui recouvre l'intérieur et l'extérieur de la surface annulaire découpée dans l'isolateur par un plan horizontal.

3° Il faut qu'une partie de l'isolateur soit exposée à la pluie, qui le lave et enlève la poussière, les dépôts de sel et de fumée, les toiles d'araignée, etc.

4° Il faut que le reste de l'isolateur soit à l'abri de la pluie, en sorte que l'intérieur puisse encore isoler quand l'extérieur est mouillé. Ces deux conditions sont remplies par les modèles nos 1 et 2.

5° Il faut que la destruction d'une partie de l'isolateur n'entraîne pas la suppression de l'isolement. Dans ce but, on fabrique de bons isolateurs en trois pièces, savoir : deux cloches distinctes et un toit en ébonite s'étendant jusqu'à la tige en fer qui sert de support. C'est ainsi qu'est formé le modèle n° 2.

6° Il faut que les insectes ne se logent pas dans l'intérieur des isolateurs. Cette condition est difficile à réaliser; pour y parvenir, on réduit la profondeur des cavités entre les cloches.

7° Il faut que l'isolateur soit protégé contre la malveillance et ne puisse pas être facilement brisé. Cette condition conduit à adopter le chapeau métallique du modèle n° 4.

4. Outre les pertes à la terre, les fils montés sur des poteaux sont exposés à un autre genre de déperdition : une communica-

tion électrique peut s'établir entre eux par le passage d'une partie du courant d'un isolateur sur l'autre. On prévient ce très grave inconvénient comme il suit : un fil partant du sol monte le long du poteau et le contourne dans les parties où l'électricité peut passer d'un isolateur à l'autre. Par cet artifice, on ménage au courant de perte un court circuit, c'est-à-dire une ligne sans résistance appréciable, et l'électricité qui s'échappe de l'isolateur trouve immédiatement une voie pour s'écouler à la terre. Une perte qui affaiblit simplement les courants transmis entraîne moins d'inconvénients qu'une communication transversale par laquelle une dépêche envoyée sur un fil peut passer en partie sur le fil voisin. Le *fil de terre* est élevé au-dessus du poteau et constitue un paratonnerre.

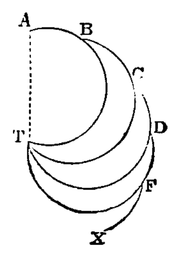
5. On mesure la résistance d'isolement d'une ligne en mesurant à l'extrémité A la résistance de cette ligne, lorsque l'autre extrémité X est isolée (*fig.* 187).

La résistance ainsi mesurée n'est pas la somme des diverses résistances d'isolement BT_1, CT_2, DT_3, etc.; mais elle représente la résistance des circuits ABT_1, BCT_2, CDT_3, etc., disposés en arc multiple comme l'indique la *fig.* 188. On peut calculer la résistance totale ainsi définie, quand on connaît la résistance de chacune des parties élémentaires du circuit. On prendra d'abord la résistance produite entre les points D et T par un arc double; à cette résistance on ajoutera celle comprise entre C et D; on composera la résistance ainsi obtenue avec celle produite par l'arc CT; le résultat sera la résistance due à tous les conducteurs entre C et T; on ajoutera CB et on continuera comme précédemment jusqu'à ce que l'on ait formé la résistance due à tous les conducteurs compris entre A et T.

Fig. 187.

Si la résistance ρ de chaque partie du fil de ligne entre deux poteaux consécutifs est constante, et si la résistance d'isolement

Fig. 188.



ρ_1 à chaque poteau est aussi constante, on peut calculer le rapport entre l'intensité I_0 du courant émis sur la ligne et l'intensité I_n du courant reçu à l'autre extrémité, au moyen de la formule suivante :

Appelons n le nombre des poteaux et posons

$$z = e^{n\sqrt{\frac{\rho}{\rho_1}}}$$

où e désigne le nombre 2,718; on a

$$(1) \qquad I_n = \frac{2\, I_0}{z + \frac{1}{z}}.$$

M. Varley considère qu'aucune ligne n'est bien isolée si la fraction $\frac{\rho}{\rho_1}$ est plus grande que $\frac{1}{80000}$. Cette fraction exprime aussi le rapport de la résistance kilométrique du conducteur à sa résistance d'isolement kilométrique. Sur une ligne de 640^{km}, où le rapport $\frac{\rho}{\rho_1}$ a la valeur précédente, l'intensité I_n du courant reçu est égale à $\frac{46}{100}$ de l'intensité I_0 du courant émis.

6. Sur les lignes sous-marines et souterraines, l'isolement dépend entièrement de la résistance que l'enveloppe isolante de gutta-

percha ou de caoutchouc oppose au passage du courant. Il ne peut y avoir de perte, par conduction à la surface, qu'aux deux bouts de la ligne, et, si l'on excepte le cas d'une négligence extrême, ou celui d'une ligne très courte, cette déperdition n'atteint pas une valeur sensible.

L'équation (1) est applicable aux lignes sous-marines, en appelant n la longueur du câble en milles, ρ la résistance du conducteur par mille et ρ_1 sa résistance d'isolement par mille.

Le conducteur est toujours un cordage de cuivre et sa résistance peut se déduire, en le supposant de cuivre pur, de la table insérée au nº 14, Chapitre XVI. Dans la pratique, on doit augmenter le résultat ainsi trouvé de 5 à 8 pour 100 pour tenir compte du défaut de pureté du métal.

De tous les conducteurs employés pour les lignes sous-marines, celui qui a le plus petit diamètre pèse 33^{kg} par mille, et celui qui a le plus grand diamètre 181^{kg}; ce dernier est le conducteur du câble atlantique français.

Les conducteurs de grand diamètre demandent, pour être recouverts et isolés, un poids de gutta-percha à peu près égal à leur propre poids; avec les conducteurs de petit diamètre, la proportion de matière isolante est encore plus considérable; pour recouvrir un mille du conducteur pesant 33^{kg} par mille, on dépense en général 54^{kg} de gutta-percha. La composition Hooper est employée quelquefois en quantités moindres que la gutta-percha.

Les essais électriques effectués pour reconnaître la qualité et l'état des matières employées dans la fabrication des câbles sous-marins ont pour objet : la mesure de la résistance de l'âme, la mesure de la résistance opposée par l'enveloppe isolante au passage du courant entre le conducteur intérieur et l'eau extérieure, et enfin la mesure en microfarads de la capacité du conducteur du câble isolé. On a exposé précédemment les méthodes suivies pour effectuer ces divers essais.

Si l'on désigne par R la résistance d'isolement d'une longueur L de câble mesurée en centimètres, cette résistance est exprimée par la formule suivante en fonction de la résistance R_s qu'un centimètre cube de la matière isolante oppose au passage du courant

entre ses faces opposées :

(2) $$R = R_s \frac{\log_\varepsilon \frac{D}{d}}{2\pi L} = R_s \frac{0,3665 \log \frac{D}{d}}{L}.$$

Dans cette formule, $\frac{D}{d}$ est le rapport du diamètre extérieur de la matière isolante au diamètre du conducteur métallique.

De l'équation précédente on tire la valeur R_m de la résistance d'isolement du câble par mille en remplaçant L par 185526, nombre de centimètres contenus dans un mille. On a ainsi

(3) $$R_m = R_s \frac{1,975 \log \frac{D}{d}}{10^6}.$$

R_s est, dans ces expressions, la quantité que nous avons désignée dans le Chapitre XVI sous le nom de *résistance spécifique de la matière isolante.*

La table qui suit donne, pour quelques câbles importants, les valeurs de R_m et de R_s à 24° C., après une minute d'électrisation.

DÉSIGNATION DES CABLES.	VALEUR de $\frac{D}{d}$.	VALEUR de R_m en mégohms.	VALEUR de R_s en mégohms.
Premier câble de Malte à Alexandrie.	2,95	115	4×10^6
Câble du Golfe Persique (section des profondeurs moyennes)..........	3,48	193	10×10^6
Second câble Atlantique (section des profondeurs moyennes)..........	3,28	349	342×10^6
Câble Atlantique français (section des profondeurs moyennes)......	2,92	234	256×10^6
Câble du Golfe Persique de Hooper (section des profondeurs moyenn.)	»	8000	7572×10^6

Le poids spécifique de la gutta-percha varie de 0,9693 à 0,981. On obtient pour tous les câbles le poids P_m de la gutta-percha par

mille au moyen de la formule

$$(4)\qquad P_m = \frac{D^2 - d^2}{1066}\,\text{kg},$$

où D et d sont mesurés en *mils*. Le *mil* est la millième partie du pouce anglais, c'est-à-dire $0^{mm},0254$. Le poids spécifique de la composition Hooper est d'environ 1,176 et le coefficient qu'il faut introduire dans la formule précédente, pour avoir le poids de cette matière par mille, est 888 au lieu de 1066. Le poids par mille P_m d'un cordage de 7 fils de cuivre disposés comme ceux des câbles sous-marins est, en kilogrammes,

$$P_m = \frac{d^2}{156,4},$$

où d est mesuré en mils.

7. En mesure électrostatique, la capacité c d'une longueur quelconque du conducteur d'un câble sous-marin peut se calculer au moyen de l'équation (6) du Chapitre V. On a plus souvent besoin de connaître la capacité électromagnétique C; or on sait (Chap. VIII, n° 2) que $C = \frac{c}{v^2}$, le coefficient v étant d'ailleurs égal à $28,8 \times 10^9$. On a donc, en mesure électromagnétique absolue,

$$C = \frac{KL}{4,6052 \times 28,8^2 \times 10^{18} \times \log \frac{D}{d}} = \frac{KL}{3820 \times 10^{18} \times \log \frac{D}{d}},$$

K étant la capacité inductive spécifique de la matière isolante (Chap. V, n° 5).

Si l'on désigne par C_M la capacité en microfarads, il vient, le microfarad valant $\frac{1}{10^{15}}$ unité de capacité électromagnétique absolue (Chap. X, n° 5),

$$(5)\qquad C_M = \frac{KL}{382 \times 10^4 \times \log \frac{D}{d}}.$$

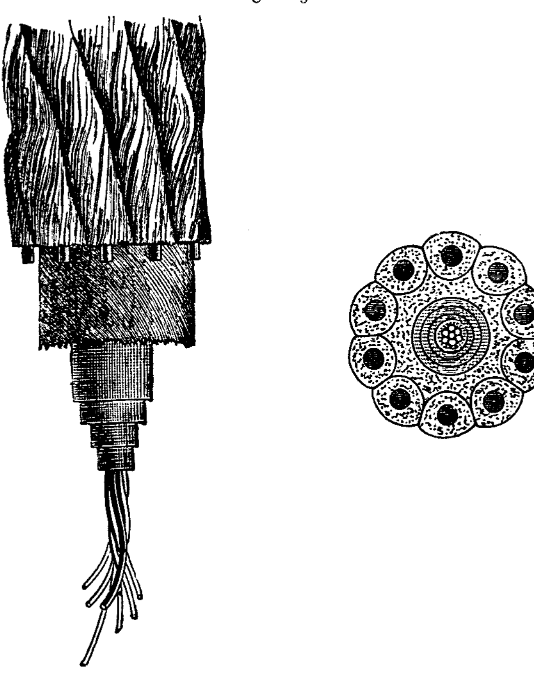
Cette valeur de C_M suppose que L est mesuré en centimètres; dans la pratique, il est commode de mesurer la longueur du câble en

milles. Comme le mille vaut 185 526^{cm}, il vient, en appelant l la longueur du câble en milles,

$$(6) \qquad C_M^m = \frac{0{,}04857\,Kl}{\log \frac{D}{d}}.$$

En prenant 4,2 pour la valeur de K correspondante à la gutta-percha, on trouve que la capacité par mille du câble atlantique

Fig. 189.

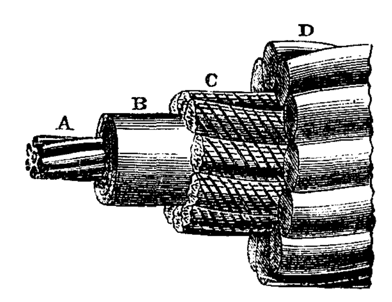


français est d'environ 0,43 microfarad. Cette valeur s'accorde avec le résultat que donne l'emploi direct de la méthode balistique (Chap. XVII, n° 5).

8. La *fig.* 189 représente en grandeur naturelle une coupe et une projection des parties qui composent le câble atlantique anglo-américain. Au centre est le *toron* ou cordage de cuivre formé

de 7 fils; autour de ce conducteur se trouve la gaîne de gutta-percha recouverte d'une enveloppe protectrice de jute, laquelle est entourée elle-même d'une armature en fils de fer homogène au

Fig. 190.



nombre de 10; chacun de ces fils est enveloppé dans un cordage finement tressé de chanvre de Manille.

La *fig.* 190 représente un modèle de câble plus communément adopté, où les fils d'acier recouverts de chanvre sont remplacés par des fils de fer de gros diamètre. Ces fils de fer, disposés comme le montre la *fig.* 190, sont souvent recouverts d'une ou deux enveloppes extérieures de jute et d'un composé de poix minérale, de silice et de goudron, connu sous le nom de composition de Clarke.

CHAPITRE XXV.

DÉFAUTS SUR LES LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES.

1. On appelle *défaut* tout obstacle à la transmission des signaux, qui résulte de l'état de la ligne. Les défauts sont de trois espèces : 1° L'isolement est mauvais ; 2° Il y a sur la ligne une solution de continuité ou une résistance excessive ; 3° Il s'est produit un contact entre deux conducteurs voisins destinés à la transmission de dépêches distinctes.

L'isolement défectueux sur les lignes terrestres est dû, soit à des isolateurs fendus, salis ou présentant quelque autre défaut, soit à un contact entre la ligne et quelque corps conducteur en communication avec le sol. Dans le premier cas, le défaut peut s'étendre sur une grande longueur de ligne : on peut déterminer son importance par des mesures électriques. Dans le second cas, le défaut réside en un point défini : on détermine son importance et sa position par des essais électriques. Sur les lignes sous-marines, un isolement défectueux est toujours dû à quelque communication entre la mer et le conducteur ou l'âme du câble, en un ou plusieurs points définis.

Un défaut de seconde espèce correspond à une rupture, soit dans le conducteur de la ligne, soit dans les communications intérieures des stations, soit enfin dans les communications de ces stations avec le sol. On peut, dans un grand nombre de cas, fixer la position de cette rupture. Souvent un défaut de première espèce

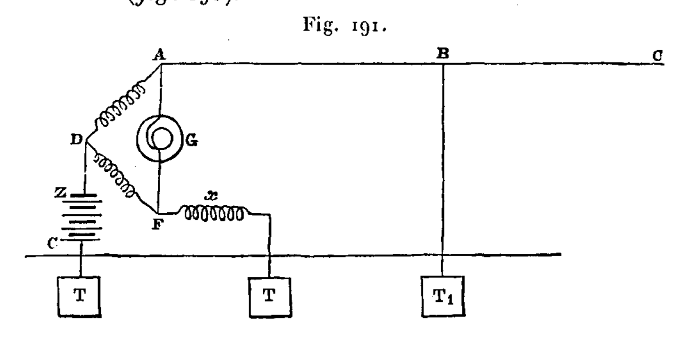
coexiste avec un défaut de seconde espèce, c'est-à-dire que la ligne est rompue et qu'en même temps le bout rompu communique avec le sol.

Les défauts de troisième espèce ne se présentent guère que sur les lignes terrestres où ils sont fréquents. Quand la communication anormale entre deux fils provient du contact effectif d'un de ces fils avec l'autre, la position du défaut se reconnaît aisément.

En général les essais qui servent à reconnaître le lieu des défauts se font plus exactement sur les lignes sous-marines que sur les lignes terrestres, parce que, sur les premières, l'isolement des parties non endommagées est généralement meilleur. Les explications qui suivent se rapportent spécialement aux défauts des câbles sous-marins, mais les mêmes principes s'appliquent aux lignes terrestres.

2. Supposons qu'un défaut existe dans un conducteur, d'ailleurs bien isolé sur tout le reste de son étendue, et que ce défaut consiste dans une perte à la terre en un point éloigné de la station A d'une distance AB (*fig.* 191).

Fig. 191.



Si la communication de B avec le sol n'offre pas une résistance sensible, il suffit de mesurer la résistance AB, et, en la divisant par le coefficient de résistance de la ligne par mille, on obtient en milles la distance AB. Cette mesure peut s'effectuer au moyen du pont ou de la balance de Wheatstone établie comme l'indique la *fig.* 191 ; AD et DF forment les deux bras de la balance ; FT est la caisse de résistances. Si l'on fait $AD = \frac{DF}{10}$ et si les chevilles de la caisse sont dis-

posées de manière à donner 1500 unités de résistance entre F et T, en même temps que le galvanomètre ne manifeste aucune déviation lors de la fermeture du circuit, ABT_1 a une résistance de 150 unités. En admettant que la ligne ait une résistance de 5 unités par mille, on conclut que le point B est à 30 milles de A. Il est recommandé de toujours isoler l'extrémité de la ligne en C pendant cette expérience.

On peut aisément reconnaître si la résistance de BT_1 a une valeur sensible ou non ; il suffit de répéter l'expérience au point C. Si, dans ce second essai, on trouve une distance BC qui, ajoutée à AB, reproduise la longueur totale de la ligne, la résistance de BT_1 peut être considérée comme nulle. Si, au contraire, la somme des résistances mesurées en A et en C correspond à une longueur plus grande que AC, la différence ne peut provenir que de la *résistance du défaut*. Car nous n'avons pas en réalité mesuré la résistance de AB, ni celle de BC, mais la résistance de $AB + BT_1$ et celle de $BC + BT_1$; si donc la somme des deux mesures dépasse la résistance de AC, l'excès représente le double de la résistance du défaut. Soient m la résistance mesurée en A, n la résistance mesurée en C, L la résistance de la ligne entière, et R la résistance du défaut. On a

$$m = AB + R, \quad n = BC + R, \quad m + n = L + 2R,$$

d'où l'on déduit

$$(1) \qquad AB = \frac{L + m - n}{2} \quad \text{et} \quad BC = \frac{L + n - m}{2}.$$

Cette méthode serait parfaite si la résistance du défaut était réellement constante pendant qu'on effectue la mesure des deux résistances m et n; mais ordinairement la résistance des défauts varie beaucoup à cause de la polarisation, et, par suite, à moins qu'il ne s'agisse de défauts considérables et de faible résistance, cette méthode ne peut fournir des résultats exacts.

3. On peut déterminer d'une autre manière la résistance de AB, en supposant d'ailleurs que la résistance du défaut soit constante. Mesurons en A la résistance m de la ligne lorsque l'extrémité C est isolée, et la résistance e de cette même ligne quand C est mis à la

terre. En appelant f la résistance du défaut et L la longueur de la ligne, on a

$$AB + f = m$$

pour la première mesure; dans la seconde mesure, la résistance observée est égale à la résistance AB augmentée de la résistance combinée des deux branches dérivées BC et BT; donc (Chap. XVI, n° 3),

$$AB + \frac{f \times BC}{f + BC} = e;$$

de plus,

$$AB + BC = L;$$

on déduit

2 $$AB = e - \sqrt{(L - e)(m - e)}.$$

Cet essai est encore moins sûr que le précédent.

En prenant un grand nombre de valeurs de m, n et e, soit avec les deux pôles d'une même pile, soit avec des piles de forces électromotrices différentes, et en considérant les plus petites valeurs obtenues comme celles qui correspondent à la valeur minimum fixe de f, on peut approcher du résultat exact par l'une ou l'autre des deux méthodes.

Dans ces essais, il faut une grande habitude pour apprécier le caractère d'un défaut; en général on parvient à déterminer la nature d'un défaut en observant la polarisation que fournissent des courants positifs et négatifs d'intensités différentes. On peut ainsi prendre un premier aperçu de sa résistance probable.

4. Lorsqu'un fil de retour bien isolé existe entre la station éloignée C et la station A, on peut déterminer avec grande exactitude la position d'une perte. Dans ce cas, l'observateur a devant lui et, pour ainsi dire, sous sa main, les deux extrémités d'un circuit métallique qu'il peut fermer à volonté : le rapport des résistances des deux sections comprises entre le défaut et les deux extrémités de ces fils à la station A, peut s'obtenir par plusieurs méthodes, qui sont toutes indépendantes de la résistance variable du défaut.

M. Varley fait usage d'un galvanomètre différentiel, et cherche à reconnaître si un courant d'égale intensité pénètre par les deux extrémités du fil et sort du circuit au lieu de la faute; cela ne se

produira que si la résistance comprise entre le galvanomètre et le défaut est la même sur les deux routes parcourues depuis la station A jusqu'au défaut. On satisfait à cette condition en disposant une caisse de résistances entre l'une des bobines du galvanomètre et le fil qui porte le défaut. La résistance r qu'il est nécessaire d'introduire pour amener au zéro l'aiguille du galvanomètre est évidemment égale au double de la résistance du fil entre la station éloignée C et le lieu du défaut. En effet, soient L la résistance commune des deux fils conjugués, et x la résistance partielle du circuit, depuis le défaut jusqu'à la station C; les deux courants de même intensité et de sens contraires se détruisent mutuellement dans le circuit, au lieu même du défaut; comme ils proviennent de la même pile, les résistances sur les deux parties du circuit doivent être égales. On a donc :

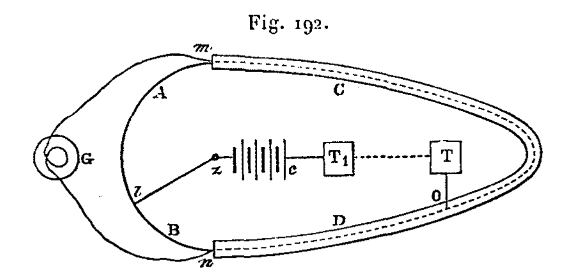
$$G + L + x + f = G + L - x + r + f,$$

d'où

$$r = 2x.$$

Peut-être arrive-t-on à un résultat plus sûr encore en disposant la balance de Wheatstone comme l'indique la *fig.* 192 : le défaut,

Fig. 192.



supposé en O, forme une partie du circuit qui relie le pôle c au conducteur métallique bifurqué en O suivant Om et On.

La variation de la résistance du défaut est sans effet sur le résultat obtenu; sans doute cette variation détermine une déviation plus ou moins grande de l'aiguille jusqu'au moment où l'équilibre cherché se trouve établi; mais elle ne modifie pas les résistances relatives que doivent présenter les diverses parties du circuit pour que l'aiguille soit au zéro. Dans cet essai, on règle les résistances

A et B de manière que le galvanomètre ne subisse aucune déviation; si l'on appelle C et D les résistances respectives des deux conducteurs qui s'étendent depuis les points *m* et *n* jusqu'au lieu du défaut O, le principe de la balance donne :

$$\frac{A}{B}=\frac{C}{D},$$

et en posant

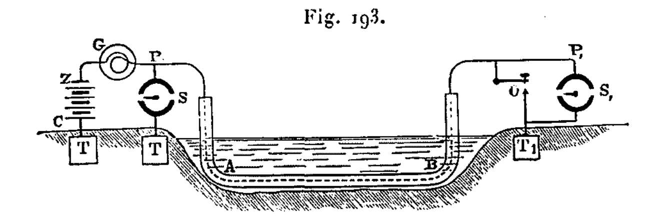
$$C+D=L,$$

on déduit, pour la valeur de C,

$$C=\frac{AL}{A+B}.$$

5. La méthode suivante permet de déterminer, dans un câble sous-marin, à l'aide d'essais effectués simultanément à ses deux extrémités, *la position d'un défaut qui présente une résistance élevée*. Dans cette méthode, on tient compte de la perte uniforme qui se produit sur la surface de chaque mille du câble isolé et on a

Fig. 193.



l'avantage d'obtenir des résultats beaucoup plus concordants qu'avec les procédés décrits aux numéros 2 et 3 de ce Chapitre. Les communications nécessaires sont indiquées dans la *fig.* 193; à l'une des stations se trouve le galvanomètre G et un électromètre S; à l'autre station où l'extrémité du câble est d'ailleurs isolée, se trouve un autre électromètre S_1. L'un des pôles de la pile CZ est en communication avec le galvanomètre G, et l'autre pôle est mis à la terre. Appelons ρ la résistance de l'unité de longueur du conducteur; ρ_1 la résistance que l'unité de longueur du fil isolé oppose au passage du courant à travers l'enveloppe isolante; L la longueur du câble; λ la distance du défaut à celle des deux stations où se trouve le galvanomètre; V le potentiel du câble à la station G; V_1 le

potentiel du câble à l'autre station, et enfin I l'intensité du courant observé sur le galvanomètre.

Si l'on pose :

$$a = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_1}},$$

$$u_0 = V_0 + \frac{\rho}{a} I - V_1 e^{aL},$$

$$u_1 = V_1 e^{aL} + \frac{\rho}{a} I - V_0,$$

on a

$$\lambda = \frac{1}{2a} \log_e \frac{u_0}{u_1}.$$

Les mesures doivent être effectuées dans un système d'unités qui s'accordent : on peut adopter, dans toute la série des expériences, les unités absolues du système C.G.S.

L'essai exige deux instruments au moyen desquels les potentiels V_0 et V_1 puissent être obtenus en mesures absolues.

6. En général l'isolement défectueux d'un câble sous-marin a pour cause une fissure ou une gerçure dans la substance du diélectrique. Ce trou s'élargit peu à peu sous l'action du courant électrique, bien que la polarisation qui se produit à l'endroit du défaut semble souvent le *fermer* momentanément. Des courants rapidement alternés, fournis par une pile de 100 éléments au moins, tendent à *ouvrir* le défaut, c'est-à-dire à élargir la fissure, en sorte que la résistance du défaut devient insignifiante. Un courant positif dirigé du fil de cuivre à la mer ferme en apparence un défaut beaucoup mieux qu'un courant de sens contraire. Il détermine dans la fissure un dépôt de chlorure de cuivre et d'oxygène, tandis que le courant négatif détermine un dépôt de sel marin et d'hydrogène. Les bulles de gaz qui se forment sous une haute pression font éclater de temps à autre la couche saline ainsi déposée et à ce moment le défaut élargi apparaît nettement. Quand ce fait se produit avec le courant négatif, il n'en résulte en général aucun autre dommage qu'un léger agrandissement de l'ouverture qui cause le défaut; au contraire le courant positif détermine une érosion lente

mais certaine du cuivre, laquelle finit toujours par occasionner une solution de continuité complète et subite dans le conducteur. Nul symptôme n'annonce à l'avance ce fatal et nécessaire dénouement; car, tant qu'un filament de cuivre subsiste, aucune diminution sensible ne se manifeste dans la résistance de la ligne. Les télégraphistes préfèrent travailler sur les câbles avec le courant positif, parce qu'ils obtiennent ainsi des signaux meilleurs; les courants reçus sont plus intenses et moins troublés par les variations subites qui se produisent dans la résistance du défaut. Toutefois cette pratique est vicieuse et il est essentiel qu'un câble défectueux soit maintenu dans un état électrique négatif par rapport à la mer. On peut transmettre des signaux excellents à travers un câble ou une ligne qui présente un défaut d'une importance telle que sa résistance soit de beaucoup inférieure à la résistance du conducteur entre les deux stations correspondantes. D'une manière générale, on peut dire que rien n'empêche absolument la communication ou la transmission, si ce n'est une solution de continuité dans la ligne.

Quelquefois le défaut est produit par la présence d'un corps étranger dans la matière isolante. Quand un fragment métallique, par exemple un morceau de fil rompu, pénètre à travers le diélectrique et met le fil conducteur en communication avec la mer ou avec l'armature métallique, il se produit un défaut dont la résistance est insensible; ce genre de défaut se reconnaît aisément par l'absence de polarisation.

7. Un défaut de seconde espèce, c'est-à-dire une solution de continuité, peut se combiner avec un défaut de première espèce: ainsi un câble ou un fil aérien peut être rompu et le bout rompu peut se trouver en communication plus ou moins parfaite avec le sol. Dans ce cas, il est impossible de procéder à des essais simultanés aux deux extrémités de la ligne. On ne peut que mesurer la résistance des deux portions intactes du fil et reconnaître, d'après la polarisation, pour quelle part la résistance du défaut entre vraisemblablement dans la résistance totale observée. Il est toujours possible de fixer sûrement une distance maximum au delà de laquelle le défaut ne saurait se trouver; quand la polarisation a

atteint sa valeur minimum, l'extrémité mise à nu du fil du câble a ordinairement une résistance égale à celle de plusieurs milles de ce conducteur.

Assez fréquemment on rencontre un défaut de seconde espèce, en même temps que l'on constate un isolement parfait de la ligne. Le conducteur est rompu, mais isolé au point de rupture. Sur un câble sous-marin, on peut mesurer très exactement la distance à laquelle se trouve la rupture en mesurant la capacité du câble entre la côte et le point de rupture en mer. Comme la capacité par mille est connue, cet essai donne avec une grande exactitude la distance cherchée. Sur une ligne terrestre, l'isolement est rarement assez bon pour que cette méthode puisse être appliquée.

8. Le lieu d'un défaut de troisième espèce, c'est-à-dire d'un contact entre deux conducteurs voisins, est facile à déterminer si le contact n'existe que sur un point et ne présente qu'une faible résistance. Il suffit de mesurer la résistance de la boucle formée par le contact des deux fils, et la moitié de cette résistance représente évidemment la résistance correspondant à la distance cherchée de la faute. Lorsque le contact est imparfait, on peut déterminer très exactement sa position à l'aide d'un troisième fil, si celui-ci est bien isolé : pour y parvenir, on traite un des deux fils en contact comme une terre, en le laissant en communication avec le sol, et par la méthode de la boucle exposée au numéro 4 ci-dessus on fixe la position du point de contact sur l'autre fil; en effet ce contact devient maintenant un défaut de première espèce.

La position du contact ou, comme on dit, du *mélange* de deux fils peut encore être déterminée, sans le secours d'un troisième fil, à l'aide de la balance Wheatstone. A cet effet, on établit les communications de la manière suivante (*fig.* 135) : r_1 et r_3 sont deux boîtes de résistances; r_2 et r_4 sont les deux parties de l'un des deux fils défectueux, le point de contact ou de partage étant supposé en A_1. Le point B_1 représente l'extrémité de ce fil à la station correspondante où il est mis à la terre. La branche r est composée du galvanomètre et de la terre en B_1; le fil qui réunit la pile au point A_1 est le second fil de ligne mélangé au premier en A_1; l'extrémité de ce second fil, à la station correspondante, est isolée.

En appelant x et y les deux parties du premier fil, on a

$$r_2 = x \quad \text{et} \quad r_4 = y.$$

Lorsque la balance est équilibrée, on peut écrire

$$\frac{x}{y} = \frac{r_1}{r_3};$$

comme on connaît d'ailleurs la somme $x + y = \text{L}$, on déduira de la relation précédente

$$x = \text{L}\,\frac{r_1}{r_1 + r_3}, \qquad y = \text{L}\,\frac{r_3}{r_1 + r_3};$$

les quantités x et y indiqueront le lieu du mélange.

CHAPITRE XXVI.

APPLICATIONS UTILES DE L'ÉLECTRICITÉ EN DEHORS DE LA TÉLÉGRAPHIE.

1. L'électricité a reçu un si grand nombre d'applications aux arts utiles qu'un traité spécial très volumineux pourrait être écrit sur ce sujet. Dans ce Chapitre, nous nous bornerons, sans entrer d'ailleurs dans aucun détail, à mentionner quelques-unes de ces applications, savoir : l'électrométallurgie, la lumière électrique, les applications électromédicales, l'inflammation des mines, les horloges, régulateurs et chronoscopes électriques.

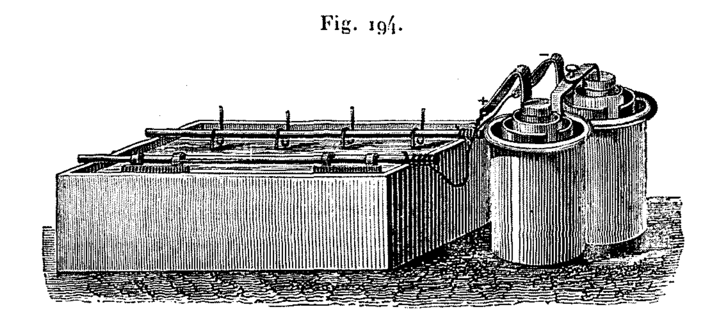
ÉLECTROMÉTALLURGIE OU MÉTALLURGIE ÉLECTRIQUE.

2. Au point de vue métallurgique, l'électricité a reçu trois applications différentes qui comprennent : 1° la dorure et l'argenture galvaniques; 2° la reproduction par des empreintes métalliques d'objets de forme quelconque; 3° l'extraction des métaux de leurs minerais.

Quand on se propose de recouvrir un objet en métal d'une couche mince d'un autre métal, on plonge cet objet dans la dissolution d'un sel contenant le métal que l'on veut déposer; on fait ensuite passer un courant dirigé du bain vers l'objet; ce courant décompose le sel et détermine le dépôt du métal, élément électropositif, sur l'objet qui forme l'électrode négative. Lorsque le sel est

convenablement choisi, la solution suffisamment concentrée, et l'intensité du courant bien réglée, la couche déposée a de la cohésion et adhère sur le métal. La dorure du cuivre s'obtient de la manière suivante : les objets à dorer sont d'abord passés au feu pour chasser et détruire la matière grasse qui pourrait se trouver sur leur surface. Cela fait, et quand ils sont encore chauds, on les plonge dans de l'acide azotique très étendu, qui enlève toutes les taches d'oxyde ou de sous-oxyde de cuivre; on les frotte avec une brosse dure ; puis on les lave dans de l'eau distillée et on les sèche dans de la sciure de bois légèrement chauffée. Enfin on les décape de nouveau en les plongeant rapidement dans l'acide azotique ordinaire et ensuite dans un mélange d'acide azotique, de sel gris et de

Fig. 194.



suie. Les objets ainsi préparés et présentant alors une surface métallique uniformément nette sont plongés dans un bain contenant une dissolution d'un sel d'or.

On les attache au pôle négatif d'une pile de 3 ou 4 éléments : l'autre pôle est relié à une électrode d'or qu'on plonge aussi dans le bain. Le passage du courant décompose le sel; l'or se dépose sur l'objet et une égale quantité d'or, provenant de l'électrode positive, entre en dissolution dans le bain. Le temps nécessaire à l'opération dépend de l'épaisseur de la couche métallique que l'on veut obtenir. On compose un bain convenable avec 1gr d'or et 10gr de cyanure de potassium dans 200gr d'eau. L'argent, le bronze, le laiton, le maillechort ou argent allemand peuvent être dorés directement de cette manière; mais, pour dorer le fer, l'acier, le zinc,

l'étain ou le plomb, il est nécessaire de recouvrir d'abord ces métaux d'une couche de cuivre galvanoplastique. Le bain qui fournit le dépôt de cuivre est une solution saturée de sulfate de cuivre. L'électrode positive doit être dans ce cas une lame de cuivre.

Pour l'argenture, on emploie un bain formé de 2^{gr} de cyanure d'argent et d'un égal poids de cyanure de potassium dans 200^{gr} d'eau; l'électrode positive doit être une plaque d'argent.

3. La reproduction d'objets par l'électricité consiste dans la précipitation d'une couche épaisse de métal sur des moules convenables, dont la surface ou l'empreinte a été *métallisée*, c'est-à-dire rendue conductrice du courant. Ce dépôt est fourni par un bain que décompose un courant électrique; il se forme de la même manière que le dépôt d'or et d'argent obtenu dans le procédé précédent. Si le moule est métallique, on le recouvre d'une légère couche de matière grasse pour empêcher l'adhérence du dépôt. Il suffit, dit-on, pour obtenir ce résultat, de frotter le moule avec une brosse qui a été passée rapidement à travers une flamme fuligineuse. Ganot recommande, pour mouler les objets métalliques, l'alliage fusible de Street qui se compose de 5 parties de plomb, 8 de bismuth et 3 d'étain. Pour mouler les objets en plâtre, on se sert de stéarine; ces objets sont d'abord plongés dans de la stéarine fondue et retirés rapidement; une petite quantité de stéarine est absorbée par les pores du plâtre; on les recouvre ensuite de graphite ou de plombagine que l'on étend sur leur surface avec une brosse. On peut alors prendre l'empreinte de ces objets ainsi préparés. La surface intérieure du moule en stéarine est métallisée avec du graphite, qui la rend conductrice du courant.

La gutta-percha peut aussi servir à la préparation des moules. Après l'avoir ramollie dans l'eau chaude, on l'applique sous une pression suffisante contre la surface des objets à reproduire; ceux-ci ont été préalablement recouverts d'une couche de graphite pour éviter l'adhérence. On métallise de la même manière l'intérieur du moule pour le rendre conducteur. Ainsi préparé, on le plonge dans un bain de sulfate de cuivre où il forme l'électrode négative. Il se remplit peu à peu d'un dépôt de cuivre qui reproduit avec fidélité les détails de l'empreinte et de l'objet original. Ce

procédé, qui constitue l'art de la galvanoplastie, est d'un grand usage en typographie : il permet de reproduire et de renouveler ces belles planches de cuivre qui supportent plusieurs milliers de tirages.

4. La réduction des minerais par l'électricité n'a jamais été effectuée sur une large échelle ; cependant plusieurs métaux rares n'ont été découverts que par la décomposition de leurs sels sous l'action du courant électrique. Davy a obtenu le potassium pour la première fois en décomposant un morceau de potasse légèrement mouillé par le courant d'une pile de 200 ou 250 éléments. On peut se procurer le sodium de la même manière; mais on connaît aujourd'hui d'autres procédés qui sont préférables au point de vue de l'économie.

Le barium, le calcium, le magnésium, l'aluminium, etc., peuvent être obtenus au moyen de l'électrolyse.

Les minerais d'argent, de plomb et de cuivre ont été traités par les procédés électriques; on trouvera de nombreux détails sur cette question dans l'ouvrage de MM. Becquerel sur l'électricité et le magnétisme (Vol. II).

LUMIÈRE ÉLECTRIQUE.

5. Lorsque les pointes de deux crayons de charbon de bois ou de graphite, reliées par de gros fils aux deux pôles d'une pile de 40 ou 50 éléments Grove, sont placées pendant un instant en contact l'une avec l'autre, puis écartées à une distance d'environ $0^{m},003$, un courant électrique franchit la couche d'air qui sépare les deux pointes en émettant dans cet intervalle une lumière extrêmement brillante.

On donne souvent le nom d'*arc voltaïque* à cette portion d'un circuit continu formée par un conducteur gazeux. L'arc voltaïque est lumineux dans la plupart des cas; sa couleur dépend de la nature du gaz traversé par le courant, et l'intensité de la lumière produite est intimement liée à la densité de ce gaz. Avec des gaz raréfiés, et par exemple dans les tubes de Geissler précédemment

décrits, on obtient une incandescence relativement faible; dans l'air et suivant les expériences de Fizeau et Foucault, l'intensité de la lumière électrique peut atteindre le tiers de l'intensité de la lumière solaire. L'air est très fortement échauffé dans les points situés sur le passage du courant, et sa résistance se trouve par cela même diminuée. Si le courant est momentanément interrompu, la force électromotrice de la pile est impuissante à faire renaître l'arc voltaïque, à moins que les extrémités des charbons ne soient ramenées à une très faible distance l'une de l'autre ou même au contact, pour être ensuite écartées comme précédemment après que le courant est rétabli. Cela tient à ce que la force électromotrice capable d'envoyer un courant à travers une couche d'air chaud est insuffisante quand cet air est refroidi. Le charbon des crayons est consumé dans la production de la lumière. Le crayon qui forme l'électrode positive est consumé beaucoup plus rapidement que l'autre, et il se creuse à son extrémité.

Pour faire servir la lumière électrique aux usages pratiques, les crayons sont disposés dans une lampe construite de telle sorte que l'arc voltaïque se maintient sensiblement à la même place. Ces lampes doivent être pourvues d'un système qui rapproche les crayons au fur et à mesure qu'ils se consument. Il est encore nécessaire d'adapter à la lampe un mécanisme au moyen duquel, si l'arc voltaïque vient à s'éteindre, les pointes des crayons se rapprochent aussitôt au contact, rétablissent l'arc et se séparent ensuite à la distance normale qui fournit la plus grande intensité de lumière. MM. Holmes, Serrin, Dubosc et d'autres inventeurs ont construit des lampes qui remplissent ces conditions plus ou moins parfaitement à l'aide de diverses combinaisons de rouages et d'électro-aimants. Pour l'éclairage des phares, on s'est servi avec succès d'une lampe construite par M. Holmes.

L'expérience apprend qu'il faut au moins une force électromotrice de 80 volts pour obtenir une bonne lumière électrique; la résistance du circuit, non compris l'arc voltaïque, ne doit pas dépasser 12 ou 15 ohms. Sir William Thomson a produit une bonne lumière avec 80 éléments Daniell, ayant la forme et les dimensions indiquées au n° 12, Chap. XV. Ces éléments restèrent en bon état pendant plusieurs mois; et, pour obtenir de la lumière à un moment quel-

conque, il suffisait de fermer le circuit. Les éléments Grove qui viennent d'être chargés ne fonctionnent bien que pendant quelques heures; ils répandent des vapeurs délétères.

M. Waring produit une lumière électrique intense en portant à l'incandescence des vapeurs mercurielles. Le courant traverse un mince filet de mercure et le volatilise. Le mercure est enfermé dans un tube hermétiquement clos. Cette lumière a une teinte verdâtre. Une rapide succession d'étincelles qui jaillissent d'une bobine de Ruhmkorff produit aussi une lumière de faible intensité. La lumière électrique peut être utilisée en photographie; l'étude de son spectre présente plusieurs particularités d'un grand intérêt pour le physicien.

APPLICATIONS MÉDICALES.

6. L'électricité, dans son passage à travers le corps humain, peut produire des effets physiologiques très marqués. Le simple passage du courant engendré par une pile de 100 éléments cause un frémissement désagréable ou même une sensation douloureuse dans les parties du corps par lesquelles le courant entre ou sort. Cette sensation est beaucoup plus vive au moment où le courant commence et cesse qu'à tout autre instant. Quand un courant énergique et de très courte durée, tel que le courant de décharge d'une bouteille de Leyde, de dimensions ordinaires, portée au potentiel de plusieurs centaines de volts, traverse le corps humain, on éprouve dans tout l'organisme un tressaillement bien connu sous le nom de *secousse électrique*. Cette secousse peut être assez violente pour occasionner la maladie ou même la mort, et un grand nombre de personnes foudroyées sont tuées par le simple choc qui résulte de la décharge subite de l'électricité accumulée sur leurs corps par l'action inductive des nuages : la foudre éclatant entre les nuages les décharge et laisse à l'état libre l'électricité du corps humain qui s'échappe dans le sol en produisant le phénomène appelé *choc en retour*. La succession rapide des courants de courte durée et rapidement alternés, engendrés par la rotation d'une machine magnéto-électrique, détermine dans le corps humain un engourdissement singulier; si l'on prend à la main les deux

électrodes d'où s'écoulent ces courants, on les retient convulsivement sans pouvoir les lâcher. C'est la contraction analogue des muscles d'une grenouille, observée par Galvani dans des circonstances semblables, qui a été le point de départ de la découverte du courant électrique. En raison de tous ces faits, il est hors de doute que l'électricité peut servir comme agent thérapeutique; le médecin trouvera sans doute en elle le moyen de produire des modifications importantes dans l'état pathologique du corps; toutefois nous nous sentons hors d'état de parler avec quelque compétence des applications de cet ordre faites jusqu'à ce jour. Le plus souvent on a recours aux courants magnéto-électriques rapidement alternés; les effets produits et l'intensité réelle des courants employés ont-ils été l'objet d'expériences vraiment scientifiques? Nous l'ignorons. Il est possible que des résultats précieux aient été et puissent être obtenus; mais il appartient aux hommes de l'art de décider jusqu'à quel point ces résultats sont dus ou non à un hasard heureux. L'application de l'électricité à la guérison des maladies peut malheureusement être l'objet de tromperies qu'il est difficile de découvrir.

On peut, au moyen d'un fil de platine échauffé par un courant électrique, cautériser des parties du corps qu'il serait impossible d'atteindre d'une autre manière.

INFLAMMATION DES MINES.

7. Pour allumer les fourneaux de mine, on fait passer un courant à travers une couche de matière peu conductrice, qui se trouve portée au rouge et enflamme un mélange détonant ou de la poudre à canon. A cet effet, on se sert d'une fusée dans laquelle viennent aboutir deux fils isolés. Les extrémités de ces fils sont introduites à l'intérieur d'une gaîne mince de gutta-percha vulcanisée; ces deux extrémités ne se rejoignent pas, mais se terminent l'une et l'autre au sein d'une petite masse de poudre fulminante formée d'un mélange intime de sous-sulfure de cuivre, de sous-phosphure de cuivre et de chlorate de potasse. On enfonce le tout dans une cartouche remplie de poudre à canon. Un courant de faible intensité n'échauffera pas au rouge la poudre fulminante; mais un courant

énergique, même de courte durée, développera par son passage assez de chaleur pour enflammer cette poudre. En général le courant est produit par la décharge d'un condensateur, et ce condensateur est souvent chargé par une machine électrique à frottement. La machine à plateau d'ébonite, dite *machine d'Ebner*, est très fréquemment employée, ainsi qu'un condensateur formé d'une lame de caoutchouc recouverte de feuilles d'étain et enroulée en cylindre. Le courant peut être fourni par une machine magnéto-électrique ou par une pile. Quand on met le feu à une mine ou à une torpille au moyen de la décharge d'un condensateur, il est préférable d'employer un fil fin au lieu d'un fil de gros diamètre, afin que le conducteur, qui a une faible capacité, puisse s'échauffer davantage; pour la même raison, l'épaisseur du diélectrique doit être assez forte et l'isolement aussi complet que possible.

On peut encore déterminer l'explosion du mélange détonant en échauffant jusqu'au rouge un fil fin de platine tendu entre les deux extrémités des conducteurs de cuivre dans l'intérieur de la fusée; le fil de platine doit être recouvert de fulminate de mercure. Dans ce système on fait usage d'une pile, ce qui présente deux avantages : d'abord, on peut vérifier de temps en temps l'état des conducteurs à l'aide de courants d'intensité trop faible pour déterminer l'explosion; en second lieu, quand on se sert d'une pile, on peut réunir dans un même câble plusieurs conducteurs isolés l'un de l'autre et enflammer successivement autant de mines qu'il y a de conducteurs, disposition impraticable quand on emploie la décharge d'un condensateur; en effet, dans ce dernier cas, la décharge électrique effectuée dans l'un des fils déterminerait par induction un courant très énergique dans chacun des fils voisins et les mines feraient explosion toutes à la fois. On peut enflammer la fusée à fil mince de platine, lors même que l'isolement des conducteurs est très défectueux.

HORLOGES, RÉGULATEURS ET CHRONOSCOPES ÉLECTRIQUES.

8. Parmi les nombreuses applications utiles de l'électricité, il faut citer le procédé qu'emploie M. Alexandre Bain pour faire

marcher des horloges à l'aide d'un courant de faible intensité agissant sur un mécanisme dont la vitesse est réglée par un pendule. Ce mécanisme est analogue à celui qui met en mouvement les appareils télégraphiques à cadran. Le même inventeur, imité depuis par d'autres, gouverne la marche d'horloges installées à diverses distances, à l'aide d'une horloge type et d'un système d'électro-aimants animés par des courants. Les pendules de ces horloges oscillent librement tant qu'elles marquent l'heure exacte; mais ils sont légèrement retardés ou accélérés par l'action d'un électro-aimant si l'horloge avance ou retarde. C'est aussi à l'aide des courants électriques que les observatoires font partir les canons ou tomber les signaux qui servent à indiquer le temps.

On peut employer l'électricité pour régler la vitesse des machines. Quand la vitesse est trop grande, les boules du régulateur ordinaire, en divergeant, établissent un contact qui permet à un courant électrique de produire un frottement par l'action d'un électro-aimant.

L'électricité sert à enflammer le gaz dans une certaine classe de moteurs à gaz (machine Lenoir); enfin on a eu l'idée d'employer l'étincelle de la machine de Ruhmkorff pour allumer à distance la lampe à gaz d'éclairage.

On construit des chronoscopes électriques qui mesurent le temps à moins de $\frac{1}{1000}$ de seconde; on s'en sert pour déterminer la vitesse des projectiles. Voici la disposition générale : le projectile traverse successivement deux cibles placées en deux points éloignés de sa trajectoire; ces cibles sont remplies par un treillis de fils, faisant partie d'un circuit fermé. A chaque cible traversée, le projectile rompt le circuit et détermine la production d'étincelles qui font une petite tache sur une surface métallique ou sur un papier préparé, animé d'un mouvement uniforme de vitesse connue. La distance qui sépare les traces des étincelles permet donc de mesurer le temps employé par le projectile pour passer de l'une des cibles à l'autre.

Dans un ouvrage de ce genre, nous ne pouvons qu'énumérer ces importantes applications; à mesure que la science de l'électricité se répand, leur nombre et leur valeur s'accroissent de jour en jour.

CHAPITRE XXVII.

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE ET TERRESTRE.

1. On sait peu de chose sur la distribution de l'électricité à la surface de la terre. Suivant Sir William Thomson, la distribution la plus probable est analogue à celle qui se produirait si la surface de la terre était en général chargée d'électricité négative et formait l'armature intérieure d'un immense condensateur dont l'armature extérieure se trouverait dans les couches supérieures de l'atmosphère et dont le diélectrique serait représenté par les couches inférieures. Les masses d'air électrisées qui se meuvent à une faible distance de la terre modifient sans cesse la distribution de l'électricité sur la surface du sol; cependant on constate en général que cette électricité est négative. Pour déterminer la densité et le signe de l'électricité à la surface de la terre, on suit une méthode analogue à celle du plan d'épreuve. Un corps conducteur en contact avec le sol est isolé, puis apporté dans la salle d'expériences où l'on constate, à l'aide d'un électromètre, la densité et le signe de l'électricité recueillie. Nous parlons ici de la charge électrique à la surface de la terre et non du potentiel des couches d'air voisines; car le potentiel de l'air doit être l'objet de recherches distinctes. On ne peut appliquer à l'air la méthode précédente, parce que l'air est isolant et ne cède pas son électricité à un conducteur quelconque analogue à un plan d'épreuve.

2. Le potentiel de la surface du sol est considéré comme le *zéro* ou le point à partir duquel tous les autres potentiels sont mesurés. On sait toutefois que les potentiels des divers points de la surface ou de la masse terrestre présentent des différences considérables, quelquefois même égales à plusieurs centaines de volts, bien que ce cas soit rare. C'est ce que nous apprennent les courants observés sur les fils qui réunissent deux points de la terre très éloignés l'un de l'autre. Ces courants étant connus, ainsi que la résistance du circuit, on en peut conclure avec certitude la différence des potentiels aux extrémités du fil. La différence de potentiel entre les deux côtés de l'Atlantique reste souvent inférieure à deux volts ou même à un volt, et en général deux points séparés par la mer demeurent à peu près au même potentiel; toutefois cet état de choses est singulièrement modifié de temps en temps par les perturbations qu'on appelle *orages électriques*. On n'a pas encore composé un tableau indiquant la distribution du potentiel à la surface de la terre.

3. Un conducteur à l'extrémité duquel brûle une flamme, ou bien un petit tube d'où l'eau s'écoule goutte à goutte, ne tardent pas à prendre le potentiel de l'air dans les couches où la mèche brûle et où la veine liquide se résout en gouttelettes; car, s'il existe quelque différence de potentiel entre le conducteur et l'air, près de la flamme ou de l'extrémité du tube, il en résultera une accumulation d'électricité sur la flamme ou sur l'extrémité du tube, et cette électricité sera alors entraînée par les gaz chauds qui s'élèvent de la flamme ou par les gouttes d'eau qui tombent du tube, jusqu'à ce qu'il ne subsiste plus aucune différence de potentiel entre le conducteur et l'air voisin.

Ce fait nous permet de mesurer le potentiel de l'air en un point quelconque, c'est-à-dire de comparer son potentiel avec celui de la terre. A cet effet, un conducteur pourvu d'une flamme ou d'un tuyau d'écoulement est mis en communication avec l'une des paires de quadrants de l'électromètre à miroir; cette paire de quadrants est ainsi amenée au potentiel que l'air possède dans la région de l'atmosphère que l'on veut explorer. L'autre paire de quadrants est reliée au sol et la différence des potentiels est mesurée par la dévia-

tion de l'électromètre, à la manière ordinaire. On peut employer d'autres formes d'électromètres. Sir William Thomson a trouvé que le potentiel de l'air varie très rapidement dans le voisinage du sol. Ainsi il a eu l'occasion d'observer par un beau temps, entre la terre et la couche d'air élevée de $2^m,70$, une différence de potentiel égale à 430 volts; et, avec les brises légères de l'Est et du Nord-Est, la différence de potentiel de deux points situés à $0^m,30$ de distance verticale peut atteindre la même valeur. Le potentiel de l'air varie sans cesse, même par un temps calme. Pendant quelque temps, on a installé à l'Observatoire de Kew et dans d'autres stations des appareils destinés à enregistrer, d'une manière continue, les différences de potentiel qui existent entre la terre et un point déterminé de l'atmosphère. En général on peut dire que le potentiel de l'air est positif par le beau temps et ne devient négatif que par un temps incertain ou pluvieux.

4. La distribution de la force magnétique à la surface du sol a déjà été l'objet de quelques remarques au Chapitre VII. On peut admettre que cette force est entièrement due à des courants qui circulent autour de la Terre et sont entretenus par l'action thermo-électrique émanant du Soleil ou par quelque autre cause liée au mouvement de rotation de la Terre. Quoi qu'il en soit, les observations recueillies ne permettent pas jusqu'à présent de formuler une opinion précise sur cette question.

CHAPITRE XXVIII.

BOUSSOLE MARINE.

1. Le compas ou boussole marine consiste en un disque de carton mobile sur un pivot vertical; ce disque est soumis à l'action directrice d'un ou plusieurs aimants fixés parallèlement sur la face inférieure du carton et ayant leurs pôles de même nom tournés dans le même sens. Comme ces aimants sont libres de tourner dans un plan horizontal, ils s'orientent d'eux-mêmes dans le méridien magnétique. En employant plusieurs aimants, on a pour but d'accroître, autant que possible, le moment magnétique correspondant à un poids donné d'acier. La face supérieure du disque est partagée en 360° et aussi en 32 secteurs comprenant chacun 11°15′; les 32 rayons ainsi tracés forment la *Rose des vents;* la ligne qui joint les points marqués Nord et Sud est parallèle aux axes polaires des aimants. La ligne Nord-Sud indique pour chaque lieu le méridien magnétique. Comme on l'a vu au Chapitre VII, la déclinaison varie suivant les temps et les lieux. Avant de pouvoir déterminer, à l'aide de la boussole, le Nord vrai ou toute autre direction vraie, on doit reconnaître, au moyen de cartes ou autrement, la valeur particulière de la déclinaison du lieu à l'époque de l'observation.

2. La présence d'une masse de fer ou d'acier dans le voisinage de la boussole modifie la direction des lignes de force dans le champ magnétique et produit ce qu'on appelle une *déviation* de la ligne Nord-Sud, qui s'écarte ainsi du méridien magnétique. Sur les navires en bois, il suffit de prendre quelques précautions dans l'in-

stallation de la boussole, pour éviter complètement toute erreur de déviation de quelque importance pratique; mais, sur les navires en fer, il est nécessaire de tenir compte des déviations et de les compenser en partie. La déviation, dans ces derniers, est due à deux causes: 1° à l'aimantation permanente du navire, 2° au magnétisme induit par la force magnétique de la terre. On peut compenser l'effet de l'aimantation permanente en disposant convenablement, dans le voisinage de la boussole, un aimant d'acier qui développe un couple égal et contraire au couple dû aux masses de fer du bâtiment.

Quant à l'aimantation induite, on ne peut pas la compenser, ou du moins on ne peut la compenser que très imparfaitement; car il est impossible d'installer, près de la boussole, un assemblage de pièces de fer doux, telles que le magnétisme induit dans leur masse exerce sur la boussole une action égale et contraire à l'action du magnétisme induit du navire. Ce magnétisme varie, en effet, suivant la direction du vaisseau; ainsi, quand le cap est sur le Nord ou le Sud, le moment magnétique du bâtiment est beaucoup plus grand que si le cap est sur l'Est ou l'Ouest. En déterminant expérimentalement dans le port la déviation qui se produit pour chaque orientation du navire, on obtient la correction propre à la région voisine de ce port. Toutefois l'aimantation induite du navire varie encore en même temps que la direction et l'intensité de la force magnétique terrestre; on ne peut corriger par aucun procédé sûr les erreurs qui résultent de ces variations. D'ailleurs l'aimantation induite est modifiée par le mouvement de tangage et surtout par le mouvement de roulis. L'erreur provenant du tangage peut être compensée comme l'a montré Archibald Smith. Le *Manuel de la Boussole marine*, dû à la collaboration de ce dernier et du capitaine de vaisseau Evans, doit être consulté par tous ceux qui veulent connaître cet instrument. Par ses recherches mathématiques et pratiques, Smith a rendu les plus grands services, en augmentant nos connaissances scientifiques et en nous fournissant le moyen de tirer de la boussole une plus grande utilité.

La boussole *prismatique* et la boussole *azimuthale* sont des instruments pourvus de dispositions spéciales qui servent à prendre les relèvements.

CHAPITRE XXIX.

TÉLÉPHONE ET MICROPHONE.

En 1837 Page remarqua que l'aimantation et la désaimantation du fer sont accompagnées d'un bruit particulier.

En 1861 Reiss, de Friedrichsdorf, imagina un appareil au moyen duquel une note de musique émise à l'une des extrémités d'un fil télégraphique est reproduite à l'autre extrémité. Une anche vibrante ferme et rompt un circuit à la station qui transmet, et par suite un courant est envoyé dans le fil à chaque période de vibration de l'anche. Ce courant aimante un petit cylindre de fer doux, et, à chaque transmission, on entend un bruit semblable à un tic-tac, qui ne présente aucun caractère musical, mais qui produit sur l'oreille l'effet d'une note déterminée quand il se répète par seconde un nombre de fois déterminé. Ainsi, lorsque l'anche vibre de manière à donner une certaine note, une note de même hauteur se fait entendre à l'autre extrémité de la ligne ; mais les autres qualités du son transmis par l'anche ne se retrouvent pas dans le son reçu. A chaque période de vibration de l'anche correspond un changement dans l'état magnétique du fer doux récepteur ; c'est la seule analogie entre l'anche et l'aimant, entre la cause et l'effet. On ne connaît pas encore d'une manière certaine la cause du bruit particulier rendu par le cylindre de fer qui s'aimante et se désaimante ; il est possible que ce son soit dû simplement au raccourcissement et à l'allongement de la masse entière du cylindre ; peut-

être aussi doit-on l'attribuer à des changements moléculaires plus compliqués. On pourrait supposer que l'oreille doit entendre à la fois la note transmise et son octave; mais il n'en est pas ainsi; l'ensemble du changement périodique, produit dans l'aimant à chaque vibration de l'anche, est perçu par l'oreille comme un son dû à une vibration simple.

L'appareil imaginé par Reiss peut être appelé un *téléphone* puisqu'il reproduit à distance, par l'intermédiaire du courant électrique, un des caractères de la note émise, à savoir, la *hauteur*. Avec cet appareil, on n'obtient et on ne peut obtenir au récepteur que ce seul caractère. Non seulement il est impropre à reproduire des sons articulés ou la qualité d'une note musicale, mais encore une variation dans l'intensité de la note à la station qui transmet ne produit qu'un changement nul ou insignifiant dans l'intensité de la note entendue à la station qui reçoit.

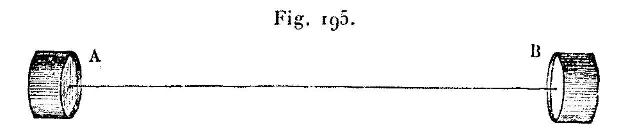
En 1870, M. C.-F. Varley a découvert qu'un son analogue à celui que donne l'aimantation du fer pouvait être produit par la charge et la décharge rapides d'une bouteille de Leyde ou d'un condensateur. Ce son est probablement dû aux modifications qui se produisent dans le groupement des particules du diélectrique, sous l'influence des changements de pressions exercées par les charges électriques. M. Varley a montré que cette propriété du condensateur pouvait être utilisée pour transmettre une note musicale, et il a proposé de faire servir cette découverte à la transmission simultanée de plusieurs dépêches par le même fil. L'appareil de M. Varley ne pouvait transmettre que la hauteur du son émis, le seul caractère que reproduisait aussi le téléphone de Reiss.

Élisha Gray, de Chicago, développa l'application pratique de l'idée de Reiss et parvint par ce procédé à transmettre sur une même ligne plusieurs dépêches à la fois. A cet effet, il disposa un certain nombre d'anches ou de diapasons, accordés chacun sur une note fixe, qui fermaient et rompaient le circuit à la station de départ. A la station d'arrivée, l'aimant reproducteur du son était mis en communication avec un même nombre de caisses sonores accordées sur les notes correspondantes des anches ou des diapasons. Quand un diapason, par exemple, entrait en vibration, la caisse sonore correspondante résonnait à l'unisson et les autres demeuraient silen-

cieuses. On sait que des caisses de ce genre, appelées *résonnateurs*, servent à l'analyse des sons composés : elles montrent nettement quelles sont les notes simples associées à la note fondamentale. De même les caisses sonores installées sur le circuit télégraphique analysaient les ondes complexes du courant électrique dans leur mouvement de flux et de reflux; chaque résonnateur rendait un son aussi longtemps que le diapason correspondant ajoutait l'effet de ses impulsions successives au courant composé qui cheminait sur la ligne. M. Gray a, dit-on, imaginé le moyen de reproduire à la station d'arrivée l'intensité des notes aussi bien que leur hauteur musicale.

Aucun de ces téléphones ne pouvait transmettre la parole articulée. L'articulation ne dépend pas seulement du nombre et de l'intensité des impulsions que l'oreille reçoit dans un temps donné, mais encore de la loi suivant laquelle cette intensité croît ou décroît, c'est-à-dire, en un mot, de la *forme* de l'onde qui frappe la membrane du tympan. L'articulation ne saurait donc être obtenue avec un instrument qui reproduit seulement le nombre des ondulations émises en une seconde ou même leur intensité et leur nombre.

Fig. 195.



Un simple disque entre en vibration sous l'influence des ondes de la voix humaine, qui viennent frapper une de ses faces, et il obéit aux impulsions de ces ondes aériennes avec une exactitude et une fidélité telles que, s'il était possible de les reproduire par un moyen mécanique quelconque sur un disque semblable placé à distance, ce disque communiquerait à l'air environnant une agitation vibratoire qui restituerait l'articulation de la parole. C'est là un fait que démontre un jouet d'enfant très répandu et connu longtemps avant la découverte du téléphone électrique. Le jouet dont nous voulons parler consiste en deux disques de peau ou de papier identiques et réunis l'un à l'autre par un cordon (*fig.* 195).

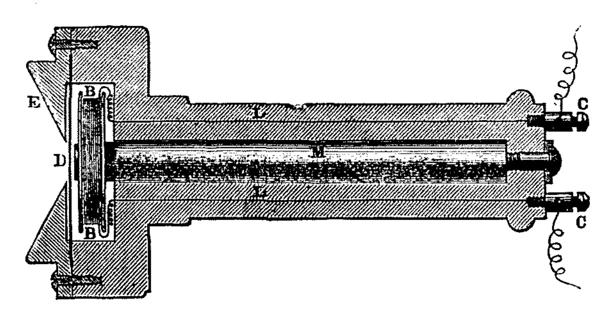
En parlant en A, on détermine sur la membrane A des vibrations

qui suivent exactement les impulsions apportées par la voix. Ces mouvements sont transmis par le cordon à la seconde membrane, en sorte qu'une personne ayant son oreille en B peut entendre cette membrane prononcer les paroles émises devant la membrane A. Cette transmission du son ne doit pas être attribuée à quelque pouvoir conducteur particulier au cordon qui relie les membranes; le transport du son est un simple phénomène mécanique. Chaque fois que la membrane A est portée vers la droite, le cordon tire la membrane B vers la droite; chaque fois que la membrane A est poussée vers la gauche, le cordon est ramené vers la gauche et par suite laisse la membrane B se porter à son tour vers la gauche. Mais il y a plus; la membrane B obéit exactement aux impulsions transmises par la membrane A pendant la durée de chaque oscillation; et, si compliquée que soit la loi du mouvement vibratoire dans la membrane A, la membrane B suit exactement la même loi dans ses excursions de part et d'autre de sa position d'équilibre. Ainsi le cordon ne transmet pas seulement à B le nombre des impulsions et leur amplitude totale; mais il transmet encore ce qu'on pourrait appeler leur *forme ondulatoire*. C'est cette dernière propriété qui permet à ce petit appareil de produire des sons articulés. Si le cordon ne possédait pas cette propriété, il ne pourrait transmettre que des sons musicaux, et encore fort imparfaitement; car il fournirait le son fondamental de la note sans reproduire en aucune façon ce qu'on appelle en acoustique le *timbre* ou la *qualité* du son.

C'est au professeur Graham Bell, de Boston, fils d'Alexandre Melville Bell, d'Édimbourg, auteur bien connu de l'ouvrage intitulé *Système de la parole visible*, qu'on doit la découverte d'un téléphone électrique, c'est-à-dire d'un téléphone qui transmet la parole par des moyens électriques, en la reproduisant plus complètement que ne le fait le jouet d'enfant par des moyens mécaniques. De plus, tandis que la transmission mécanique de la parole n'est possible que sur de très faibles distances, la transmission électrique s'effectue sur des fils de plus de 100^{km} de longueur. Comme le jouet qui sert au transport mécanique du son, l'instrument est symétrique, ou, en d'autres termes, l'appareil de réception est le même que l'appareil de transmission; on le voit (*fig.* 196) dans sa forme la plus

simple. Chaque membrane vibrante est représentée par une plaque mince de fer D, insérée entre l'embouchure E et une poignée en bois L. Cette plaque est ordinairement faite avec une sorte de tôle dont les photographes se servent pour leurs obturateurs à teintes dégradées. Sous l'influence de la voix, la plaque D vibre précisément comme vibrait tout à l'heure la membrane du jouet. Derrière la plaque, et tout près d'elle, est disposé l'un des pôles d'un barreau aimanté M; autour de ce pôle on enroule un fil recouvert de soie de manière à former une petite bobine B. Les deux extrémités de cette bobine communiquent avec les bornes CC. L'étui de bois

Fig. 196.



sert à relier toutes les parties de l'appareil et fait l'office d'une poignée, avec laquelle l'instrument peut-être porté à la bouche ou tenu devant l'oreille.

Lorsque deux appareils de ce genre sont placés dans un circuit télégraphique, un mouvement quelconque de la plaque D de l'un de ces appareils modifie l'intensité du champ magnétique dans lequel est placée la bobine B. Cette modification produit un courant d'induction dans le circuit. A son tour ce courant détermine une modification correspondante dans l'intensité du champ magnétique de l'appareil récepteur et par suite un mouvement de la plaque de cet appareil. Si le fil est enroulé dans le même sens sur les deux bobines, ce mouvement sera de direction contraire à celui de la plaque qui transmet; mais les mouvements se correspondent exactement et de la même manière que dans le jouet dont nous avons parlé; l'oscillation de la membrane de réception s'accorde, dans

chacune de ses phases, avec l'oscillation de la membrane d'émission; toutefois une distinction est à faire. Dans le jouet, où l'action est mécanique, les mouvements vibratoires des deux disques sont à peu près égaux; au contraire, dans le téléphone, où l'action est électrique, les mouvements sont proportionnels l'un à l'autre, mais ils sont loin d'être égaux; le mouvement de la plaque qui transmet est infiniment plus grand que le mouvement de la plaque qui reçoit. En effet, les courants qui agissent dans le téléphone sont des courants induits par le mouvement de la plaque en fer, qui joue le rôle d'une armature vis-à-vis de l'aimant. Or les mouvements de ce disque sont excessivement petits et les courants induits ont eux-mêmes une intensité excessivement petite; mais cette intensité augmente ou diminue de manière à déterminer, dans la seconde plaque, des mouvements proportionnels aux mouvements de la première. Le son produit par la seconde plaque possède donc tous les caractères du son qui met la première en mouvement, sauf l'intensité. Les mots entendus à la station de réception sont parfaitement articulés, mais si faibles qu'il faut tenir l'instrument près de l'oreille pour les percevoir distinctement. C'est là un inconvénient qui diminue singulièrement l'utilité du téléphone; on ne peut quant à présent s'en servir comme appel.

L'explication qu'on vient de lire est celle donnée par Graham Bell; mais plusieurs faits curieux ont jeté des doutes sur l'exactitude de cette explication. On a découvert que la plaque mince en fer peut être remplacée par une plaque épaisse; or cette dernière, a-t-on dit, ne saurait fléchir assez sous l'influence de la voix pour que ses inflexions soient capables de produire des courants induits. Il est possible que le mot *fléchir* soit inapplicable dans la circonstance actuelle; mais il est certain que la surface opposée à l'aimant dans le récepteur avance et recule, exécutant ainsi des mouvements de va et vient; s'il en était autrement, elle ne transmettrait aucun son à l'air qui se trouve en contact avec elle. Ce déplacement alternatif en avant et en arrière aurait lieu encore si, à la place d'un disque de $0^{m},01$ d'épaisseur, on se servait d'une tige longue de plusieurs centimètres ou même de plusieurs mètres. Un fait beaucoup plus singulier a été reconnu par un grand nombre d'observateurs : c'est qu'on peut substituer à la plaque en fer de l'appareil de réception

une plaque faite d'une substance non magnétique et même non conductrice. On a même constaté que ce dernier appareil fonctionne encore, quoique très faiblement, en l'absence de toute plaque ou disque. Dans ce cas il semble que l'*effet Page*, comme on pourrait l'appeler (c'est-à-dire le bruit fait par l'aimant lui-même lorsque ses molécules se disposent suivant un arrangement nouveau à chaque variation de l'effort exercé sur elles), soit la cause du son entendu. Ce son devient articulé dès que l'accroissement ou la diminution de son intensité se règlent exactement sur l'accroissement et la diminution d'intensité du courant produit par les ondes de la voix à la station qui transmet. Lorsque les courants émis sont dus à la vibration de la plaque de Bell, il est évident que les sons provenant de l'effet Page doivent, approximativement du moins, s'accorder avec ceux que la plaque en fer du récepteur émettrait dans l'air extérieur. Ainsi, quand l'appareil de réception est pourvu d'une plaque en fer, on entend au moins deux voix simultanées, la voix du disque qui est forte et la voix de l'aimant qui est faible. Quand la plaque en fer est remplacée par une plaque de bois, celle-ci joue le rôle d'une caisse sonore par rapport à l'effet Page. Lorsque la plaque est conductrice, des courants induits se développent par suite de la variation du champ magnétique; ces courants tendent à mettre la plaque en mouvement et à produire un troisième son qu'on pourrait appeler l'*effet Ampère*. Enfin une quatrième source de son peut être fournie par le fil lui-même lorsque le courant change d'intensité; c'est de la Rive qui a observé ce son pour la première fois, et ses observations ont été récemment confirmées par le Dr Ferguson à Édimbourg.

M. Gott de Saint-Pierre a montré qu'il n'est pas nécessaire de recourir à aucun effet moléculaire intérieur pour expliquer l'action du téléphone. Il attache une plaque de transmission à la bobine d'un siphon enregistreur et une plaque de réception à la bobine d'un autre siphon enregistreur. Quand il parle en face de la première plaque, la bobine à laquelle cette plaque est fixée vibre dans le champ magnétique intense de l'instrument et détermine des courants induits qui mettent en mouvement la bobine de l'autre appareil; celle-ci agit sur sa propre plaque et les mots prononcés sont parfaitement entendus. Cette expérience confirme entièrement

l'explication donnée par M. Graham Bell; toutefois elle n'est pas en contradiction avec ce fait, déjà énoncé, que, dans l'appareil de réception, l'effet Page se superpose à celui qu'on pourrait appeler l'*effet Bell*. On doit bien comprendre que, si l'effet Page fournit le moyen de produire des sons articulés, ce résultat ne peut être obtenu qu'avec le téléphone de Graham Bell, et qu'aucun des appareils connus avant son invention n'était de nature à le réaliser.

Les mots que prononce le téléphone ont un accent légèrement nasillard. Suivant Helmholtz, l'accent nasillard est particulier aux sons dans lesquels manquent les notes caractéristiques simples appelées *vocables*. Bien qu'on puisse s'attendre à un résultat de cette nature dans les vibrations de la tige longue et étroite qui produit l'effet Page, l'accent nasal doit principalement tenir à la plaque vibrante; car on le retrouve dans tous les disques vibrant sous l'influence d'une action mécanique ou magnétique. Il est clair que la plaque assujettie sur son contour n'est pas libre de suivre avec une fidélité parfaite les impulsions de la voix et doit présenter des modes de vibration ou de concamération qui modifient le son.

Tait a calculé que l'intensité du courant qui anime le téléphone est environ un milliard de fois moindre que celle du courant employé dans la transmission télégraphique ordinaire.

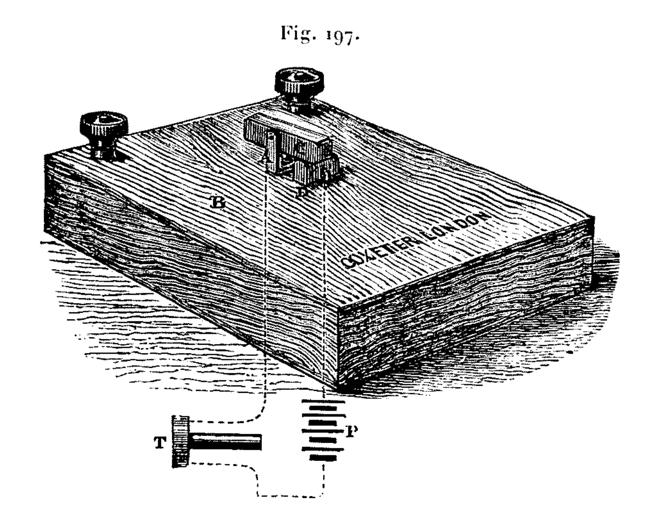
On conclut de ce résultat que, si les vibrations produites par un son sont employées à modifier la résistance d'un circuit télégraphique qui renferme un téléphone, celui-ci produira un son correspondant à ces vibrations, pourvu que le changement de résistance s'élève à $\frac{1}{10^9}$ de la résistance totale du circuit.

On peut maintenant se rendre compte du merveilleux effet du téléphone construit par Édison, et du microphone imaginé par le professeur Hughes. Ces deux instruments sont fondés sur le même principe : *On modifie la résistance d'un circuit voltaïque en modifiant la pression exercée entre deux surfaces en contact, et cette variation de résistance détermine un mouvement correspondant dans la plaque d'un téléphone introduit dans ce circuit.*

Dans le microphone, le circuit télégraphique contient une pile, un téléphone récepteur et deux blocs de charbon pressant légèrement l'un sur l'autre. Ce charbon est quelquefois *métallisé*, c'est-à-dire chauffé au rouge blanc et plongé ensuite dans du mercure. Sous l'influence des vibrations d'un son quelconque, l'un des charbons presse sur l'autre plus ou moins fortement; la résistance du circuit est modifiée; le téléphone récepteur entre en action et reproduit le son au moyen de sa plaque vibrante.

La *fig.* 197 représente un modèle de cet appareil. Un morceau de charbon C, très délicatement équilibré sur un axe, s'appuie sur un second morceau de charbon D; l'appareil est posé sur une caisse

Fig. 197.



sonore B; on établit le circuit comme l'indique la figure; en P se trouve une pile; en T est le téléphone.

Cet instrument est tellement délicat qu'on entend à distance avec le téléphone le bruit d'une mouche se promenant sur la caisse du microphone. Le changement de pression qui produit un changement de résistance a lieu entre les blocs C et D. De nombreuses expériences sur la transmission téléphonique au moyen de la variation de la pression ont déjà été effectuées. Les légères vibrations produites sur une chaîne de clous ou dans un tube plein de

cendre, sont aptes à transmettre plus ou moins parfaitement des mots intelligibles ou des sons musicaux ; M. Blith d'Édimbourg assure qu'il a entendu des sons sortir d'un vase plein de cendre qui jouait le rôle de récepteur, tandis qu'un autre vase également rempli de cendre jouait le rôle de transmetteur. Dans le téléphone de M. Édison, le changement de résistance est produit par un simple changement dans la pression d'une membrane qui vibre au-dessus d'un conducteur de métal et de plombagine : cette pression est modifiée sous l'influence des vibrations émises par la voix.

Dans les appareils de Graham Bell, d'Édison et de Hughes se retrouve toujours le principe de la continuité du circuit.

APPENDICE[1].

NOTE I.

MOUVEMENT D'UN CORPS SOLIDE AUTOUR D'UN AXE FIXE.

1. Considérons un corps solide tournant autour d'un axe fixe O (*fig.* 198), avec une vitesse angulaire ω; si B représente une particule de masse m, située à une distance r de l'axe, l'énergie ou la force vive de cette particule est égale à $\frac{1}{2} mr^2\omega^2$, et par suite l'énergie totale du corps a pour valeur

$$\frac{\omega^2}{2} \Sigma mr^2.$$

Cette somme Σmr^2, qui ne dépend que de la densité et de la forme du corps, s'appelle le *moment d'inertie* du solide par rapport à l'axe de rotation : nous la désignerons par la lettre I.

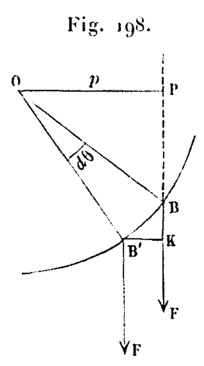
(1) Dans les Notes que nous croyons devoir placer à la suite du Livre de M. Jenkin, nous nous sommes proposé de donner les démonstrations de plusieurs principes énoncés dans ce livre, ou bien de développer quelques points délicats des théories exposées. Le lecteur trouvera réunis dans cet Appendice des renseignements qu'il lui faudrait rechercher dans les Traités de MM. Jamin, Mascart, etc.

L'énergie du corps tournant s'écrira donc

$$\frac{1}{2} I \omega^2.$$

2. Supposons que le corps solide soit sollicité par une force F, de direction constante, agissant normalement à l'axe et appliquée au point B. Au bout du temps infiniment petit dt, le point B sera en B' et le système aura tourné de l'angle $BOB' = d\theta$; soient OP

Fig. 198.



et B'K les perpendiculaires abaissées de O et B' sur la direction de la force. Le travail élémentaire accompli par la force est évidemment $F \times BK$; l'accroissement d'énergie du corps est $\frac{1}{2} I d(\omega^2)$ ou $\omega I d\omega$, en appelant ω la vitesse angulaire du corps à l'instant où la force agit. Comme l'accroissement d'énergie est toujours égal au travail effectué, on a la relation

$$\omega I d\omega = F \times BK.$$

Or les deux triangles BB'K et OPB sont semblables et donnent

$$BK = OP \frac{BB'}{OB} = OP . d\theta.$$

Mais $d\theta = \omega dt$; par suite

$$\omega I d\omega = F . OP . \omega dt,$$

et

$$\mathrm{I}\,\frac{d\omega}{dt} = \mathrm{F.OP} = \mathrm{M},$$

en désignant par M le moment de la force F par rapport à l'axe de rotation.

Si, au lieu d'une force unique, on considère un nombre quelconque de forces, on a évidemment la relation générale

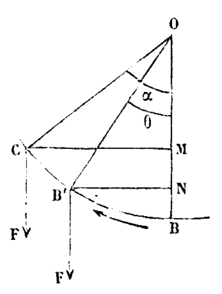
$$\mathrm{I}\,\frac{d\omega}{dt} = \Sigma\,\mathrm{M}.$$

Ainsi, *lorsqu'un corps est mobile autour d'un axe, le produit du moment d'inertie par l'accélération angulaire* $\frac{d\omega}{dt}$ *est égal à la somme algébrique de toutes les forces par rapport à l'axe de rotation.*

Le Chap. XXII, n° 10, offre une application de ce théorème à la construction des appareils télégraphiques.

3. Supposons que le corps solide, soumis à une impulsion initiale, exécute des oscillations de part et d'autre de sa position

Fig. 199.



d'équilibre, sous l'influence d'une force *constante en grandeur et en direction*, et proposons-nous de trouver la déviation α de la première vibration ou l'*élongation*. Pour fixer les idées, nous considérerons le mouvement que la pesanteur ou toute autre force analogue imprime à un pendule écarté de sa position d'équilibre par une impulsion initiale.

Soient OB (*fig.* 199) la position d'équilibre du pendule, OC la limite de son excursion et l'angle COB $= \alpha$ l'élongation cherchée; désignons par F la force accélératrice agissant dans la direction constante OB, et posons OB $= l$.

Si nous appelons ω_0 la vitesse angulaire initiale communiquée au pendule en B, le pendule une fois lancé avec cette vitesse dans le sens BC possède une énergie $\frac{1}{2}\mathrm{I}\omega_0^2$ et effectue un travail contre l'action de la force F. Dans une position intermédiaire B′, le travail dépensé est $\mathrm{F} \times \mathrm{BN} = \mathrm{F}l(1 - \cos\theta)$ et la vitesse angulaire est réduite à une valeur moindre ω. En écrivant que la perte d'énergie est égale au travail dépensé, on a l'équation

$$\frac{1}{2}\mathrm{I}(\omega_0^2 - \omega^2) = \mathrm{F}l(1 - \cos\theta).$$

Le pendule s'arrêtera lorsqu'il aura effectué contre la force F un travail $\mathrm{F}l(1 - \cos\alpha)$ égal à l'énergie primitive $\frac{1}{2}\mathrm{I}\omega_0^2$. On a donc

$$\frac{1}{2}\mathrm{I}\omega_0^2 = \mathrm{F}l(1 - \cos\alpha) = 2\mathrm{F}l\sin^2\frac{\alpha}{2},$$

d'où

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2}\omega_0\sqrt{\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{F}l}} = \frac{1}{2}\omega_0\sqrt{\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{G}}},$$

en appelant G le produit de la force accélératrice constante par la distance l de son point d'application à l'axe de rotation.

4. Enfin considérons un corps solide, mobile autour d'un axe et soumis à une force F, que nous supposons tangente à la circonférence décrite par son point d'application, proportionnelle à l'angle dont le corps est écarté de sa position d'équilibre, et constamment dirigée vers cette position d'équilibre.

Soient θ (*fig.* 200) l'écart angulaire et ω la vitesse angulaire à l'instant t; on a d'après le n° 2 la relation

$$\mathrm{I}\frac{d\omega}{dt} = \mathrm{F}l.$$

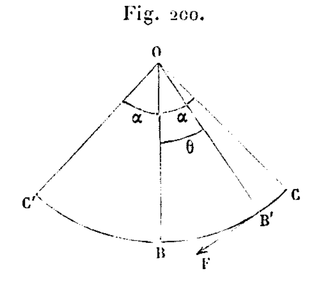
Si l'on pose $F = K\theta$, cette relation devient

$$I \frac{d\omega}{dt} = Kl\theta = M_1 \theta,$$

M_1 étant le moment de la force pour une déviation égale à l'unité.

Mais on sait que l'accélération angulaire est égale à la dérivée

Fig. 200.



de la vitesse par rapport au temps, ou à la dérivée seconde de l'arc parcouru sur la circonférence de rayon 1. Par suite

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2}{dt^2}(\alpha - \theta) = -\frac{d^2\theta}{dt^2}.$$

L'équation du mouvement est donc

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{M_1\theta}{I} = -h\theta,$$

en posant $\frac{M_1}{I} = h$.

Il s'agit de trouver la fonction qui satisfait à cette équation différentielle. Multipliant les deux membres par $2\frac{d\theta}{dt}$, on obtient, après une première intégration,

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 = -h\theta^2 + c^{te}.$$

La constante se détermine au moyen de la position initiale OC, pour laquelle $\omega = \frac{d\theta}{dt} = 0$ et $\theta = \alpha$; on a ainsi

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 = h(\alpha^2 - \theta^2),$$

d'où

$$\sqrt{h}\,dt = \frac{d\left(\frac{\theta}{\alpha}\right)}{\sqrt{1-\left(\frac{\theta}{\alpha}\right)^2}}.$$

Sous cette forme, on reconnaît dans le second membre la différentielle d'un arc sinus; intégrant une seconde fois, il vient

$$\sqrt{h}.t + c^{te} = \arcsin\frac{\theta}{\alpha}.$$

Si le temps est compté à partir de l'instant où le corps solide occupe la position extrême OC, la constante est déterminée; car $\theta = \alpha$ pour $t = 0$, ce qui donne

$$\sqrt{h}.t + \frac{\pi}{2} = \arcsin\frac{\theta}{\alpha}.$$

Passant enfin des fonctions circulaires inverses aux directes, on a

(1) $$\theta = \alpha\cos(\sqrt{h}.t),$$

et

(2) $$\frac{d\theta}{dt} = \omega = -\alpha\sqrt{h}\sin(\sqrt{h}.t).$$

Le temps t' employé par le mobile pour passer de la position initiale OC à la position d'équilibre OB s'obtient en faisant $\theta = 0$ dans la formule (1), ce qui donne

$$t' = \frac{\pi}{2\sqrt{h}}.$$

Emporté par sa vitesse acquise, le mobile dépassera la position d'équilibre OB et s'en éloignera de l'autre côté vers OC'. Il s'arrêtera quand sa vitesse sera nulle, c'est-à-dire, d'après la formule (2), au bout d'un temps T fourni par l'équation

(3) $$T = \frac{\pi}{\sqrt{h}} = \pi\sqrt{\frac{I}{M_1}}.$$

D'ailleurs, en substituant dans la formule (1) la valeur de T, on trouve $\theta = -\alpha$.

On en conclut qu'au bout du temps T, donné par la formule (3), le mobile aura atteint son écart maximum de l'autre côté de OB et sera venu en OC', à une distance angulaire égale à celle du point de départ. *Ce temps* T *est la durée d'une oscillation simple :* il est *indépendant de l'amplitude.*

Réciproquement, toutes les fois que les oscillations d'un corps solide sont isochrones, *quelle que soit l'amplitude,* on peut conclure que la force tangentielle et, par suite, le moment de la force sont proportionnels à chaque instant à l'écart angulaire qui sépare le corps de sa position d'équilibre.

5. Supposons en particulier le cas du pendule géodésique, c'est-à-dire d'un corps pesant mobile autour d'un axe horizontal fixe (*fig.* 200). La seule force *effective* est la composante tangentielle $P\sin\theta$ de la pesanteur P. Si l'on se borne à considérer des oscillations très petites, on peut remplacer le sinus par l'arc et $P\sin\theta$ par $P\theta$. Le corps est donc exactement dans le même cas que si le point B' était sollicité par une force tangente à la circonférence que décrit ce point, proportionnelle à la déviation et telle que son moment, pour une déviation égale à l'unité, fût $M_1 = Pl = G$. D'après cela, la durée des oscillations est

$$T = \pi\sqrt{\frac{I}{Pl}} = \pi\sqrt{\frac{I}{G}},$$

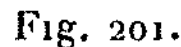
l étant la distance du centre de gravité à l'axe de suspension et G ayant la signification indiquée au n° 3.

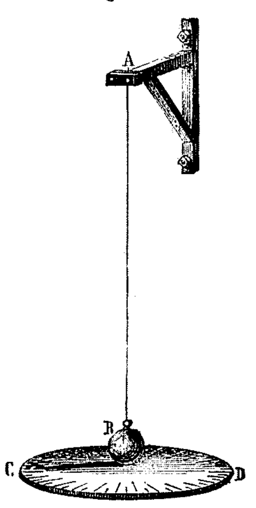
NOTE II.

LOIS DE LA TORSION DES FILS.
EXPÉRIENCES DE COULOMB.

1. Pour étudier les lois de la torsion des fils, Coulomb employait la disposition suivante :

Un fil métallique très fin (*fig.* 201) était saisi à sa partie supérieure


Fig. 201.

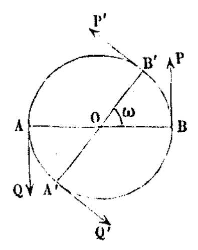


entre les mâchoires d'une pince A fixée au bras horizontal d'une

potence en bois. A son extrémité inférieure, ce fil portait une autre pince que soutenait un poids cylindrique ou sphérique en métal B. Au dessous de ce poids, sur la plate-forme servant de base à l'appareil, on disposait un cadran divisé en degrés dont le centre était placé sur le prolongement du fil : une aiguille légère, collée sous le poids B, s'étendait jusqu'aux divisions du cercle et indiquait les angles de torsion.

Supposons que, dans le plan du cercle AB et perpendiculairement au diamètre AB (*fig.* 202), on fasse agir, à égale distance du centre, deux forces égales P et Q, formant ainsi un couple dont le moment, par rapport à l'axe O, a pour valeur P × AB. Ces forces auront pour effet de *tordre* le fil et d'amener AB dans la position

Fig. 202.



A'B' pour laquelle il y a équilibre. L'angle de AB avec A'B' s'appelle l'*angle de torsion.* Le système suspendu, fil et poids, étant en équilibre, il en résulte que l'ensemble des réactions élastiques du fil déformé par la torsion se réduit à un couple horizontal, ayant même moment que le couple P'Q', mais de signe contraire. On donne à ce couple le nom de *couple de torsion.*

Le phénomène mécanique de la réaction élastique peut être envisagé d'une autre manière. Au couple de torsion P'Q' on peut substituer un autre couple, parallèle et de même sens, qui serait formé des deux forces + F, — F; l'une — F est appliquée au centre O, et l'autre + F à l'extrémité d'un bras de levier de longueur 1; l'intensité de chacune de ces forces est représentée par le même nombre que le moment P × AB du couple primitif. La force — F a pour effet de dévier le fil de la verticale; mais si l'on sup-

pose que le poids tenseur est très grand par rapport aux forces de torsion, la déviation du fil sera négligeable. On pourra donc supprimer la force — F et considérer le fil comme étant soumis à une force unique + F que l'on appelle *force de torsion*.

Si le corps suspendu, ayant été tourné d'un certain angle ω, est abandonné à lui-même, il tend à revenir à sa position d'équilibre, en exécutant de part et d'autre une série d'oscillations dont l'amplitude diminue constamment. Au moyen du poids tenseur, Coulomb donnait au fil une torsion de plusieurs circonférences et mesurait avec soin, par la *méthode des passages*, la durée d'un certain nombre d'oscillations. Il reconnut que les oscillations sont isochrones, quel que soit l'angle de torsion, cet angle pouvant même dépasser plusieurs circonférences. D'ailleurs, comme le fil reste vertical, il faut que *le moment du couple de torsion* (*ou de la force équivalente de torsion*) *soit proportionnel à l'angle de torsion*.

En appelant c le moment du couple ou de la force de torsion correspondant à un angle de torsion égal à l'unité, on peut donc écrire pour le moment C correspondant à l'angle ω,

$$C = c\omega,$$

et par suite la durée d'une oscillation sera

$$T = \pi\sqrt{\frac{I}{c}},$$

I représentant le moment d'inertie du système oscillant. Cette formule donne

$$c = \frac{\pi^2 I}{T^2}. \tag{1}$$

Il faut remarquer que c représente la force qui, appliquée perpendiculairement à un bras de levier égal à l'unité, est capable de tordre le fil d'un angle égal à l'unité trigonométrique, c'est-à-dire de maintenir l'extrémité de ce levier à une distance de la position première mesurée par un arc ayant aussi l'unité de longueur.

2. C'est au moyen de cette formule que Coulomb a déterminé les lois suivant lesquelles varie le *coefficient de torsion*.

En effet le moment d'inertie du système par rapport à son axe se réduit, à cause de la faible masse du fil, au moment du poids tenseur; si donc on fait osciller le même poids tenseur à l'extrémité de fils différents par leur section, leur longueur et leur nature, les valeurs de c sont inversement proportionnelles aux carrés des temps des oscillations; en observant ces temps dans les différents cas, on en conclura les rapports des coefficients de torsion.

Coulomb a trouvé que la valeur du coefficient de torsion est :

1° En raison inverse de la longueur l du fil;

2° En raison directe de la quatrième puissance du diamètre ou du carré de la section s du fil;

3° Variable avec la nature du fil.

Ces trois lois sont résumées dans la formule suivante :

$$c = \gamma \frac{s^2}{l}, \tag{2}$$

γ étant un coefficient constant pour une même substance; c'est le couple de torsion pour un fil de longueur 1 et de section 1.

Il résulte de là qu'en employant un fil de nature déterminée, très long et très fin, c aura une valeur extrêmement petite, de sorte que les réactions élastiques développées dans ce fil par la torsion pourront servir à équilibrer des forces *très faibles* et à en mesurer l'intensité.

Tel est le principe de la *balance de torsion.*

Les fils métalliques, aussi minces et aussi longs qu'on puisse les obtenir, ont toujours une réaction élastique sensible; mais il y a des fils dans lesquels γ est assez faible pour que la réaction développée par la torsion puisse être négligée. On donne à ces derniers le nom de *fils sans torsion;* tels sont les fils de cocon dont l'usage est général dans les appareils suspenseurs.

3. De la formule (1) on peut déduire le moment d'inertie d'un corps quelconque, en procédant selon la méthode proposée par Gauss dans ses travaux sur le magnétisme. (JENKIN, Chap. VII, n° 8.)

On suspend le corps à l'extrémité d'un fil élastique; on communique une torsion au fil et l'on observe la durée t d'une oscillation simple. Puis on place, au-dessous du premier, un second corps dont

le moment d'inertie I_1 est connu, et l'on observe de même le temps t_1 que le système ainsi formé emploie pour faire une oscillation simple. On a les deux formules

$$c = \frac{\pi^2 I}{t^2} = \frac{\pi^2(I + I_1)}{t_1^2} = \frac{\pi^2 I_1}{t_1^2 - t^2},$$

d'où l'on tire

$$I = I_1 \frac{t^2}{t_1^2 - t^2}.$$

NOTE III.

SUR LES UNITÉS FONDAMENTALES ET LES UNITÉS MÉCANIQUES DÉRIVÉES.

1. On ne peut comparer entre elles que des grandeurs de même nature : il existe donc autant d'unités que de grandeurs différentes.

Ces unités pourraient être choisies d'une manière arbitraire et indépendamment les unes des autres; c'est ainsi que l'on a procédé dans un grand nombre de cas. Mais, lorsque le choix des unités est arbitraire ou n'est réglé que par les nécessités de l'expérience, il est difficile de comparer les résultats obtenus par les différents observateurs, et de mettre en lumière les rapports qui peuvent exister entre les divers ordres de phénomènes. Aussi est-il indispensable, pour les progrès de la Science, de rattacher les unes aux autres les diverses unités en prenant pour point de départ quelques-unes d'entre elles, d'où l'on déduit toutes les autres.

Or il existe, entre les grandeurs que l'on est amené à considérer, des relations que l'étude des Sciences mathématiques et physiques apprend à connaître. Par exemple, en Mécanique, toutes les grandeurs, vitesse, accélération, force, travail, etc., peuvent être dérivées des trois unités de *longueur*, de *temps* et de *masse*. D'autre part, comme les phénomènes électriques et magnétiques sont définis ou mesurés par les effets mécaniques qu'ils produisent, ils peuvent être déterminés eux-mêmes en fonction des trois unités précédentes. On conçoit ainsi que l'on puisse établir un système

coordonné et rationnel de mesures qui simplifie les calculs dans toutes les Sciences dynamiques.

Un système de mesures, fondé sur ces principes, constitue ce qu'on nomme un système d'*unités absolues*.

Le mot *absolu* est employé par opposition au mot *relatif*. Par *mesure absolue* (comme le dit Jenkin dans son célèbre Rapport) on ne doit pas entendre une mesure exécutée avec une précision particulière, ni par *unité absolue* une unité d'une construction parfaite; en d'autres termes, quand on fait usage des mots *mesures* ou *unités absolues*, on ne veut pas dire qu'elles sont *absolument* parfaites, mais simplement que les *mesures*, au lieu d'être établies par une simple comparaison de la quantité à mesurer avec une quantité de même espèce, sont rapportées à des *unités* fondamentales dont la notion est admise comme axiome.

Dans un système de mesures coordonné, il y a donc deux espèces d'unités, les unités *fondamentales* et les unités *dérivées*.

2. **Unités fondamentales.** — Les unités fondamentales sont celles que l'on fixe préalablement d'une manière arbitraire. Il est essentiel que leur nombre soit aussi restreint que possible; leur valeur doit être uniforme en tous les points de la terre et invariable avec le temps.

On a adopté trois unités fondamentales, l'unité de temps, l'unité de longueur, l'unité de masse.

Unité de temps. — L'unité de temps universellement adoptée dans toutes les recherches physiques est la *seconde*, c'est-à-dire la 86 400ième partie du jour solaire moyen dont la durée a été fixée avec une grande exactitude par les observations des astronomes. On a reconnu que cette durée n'a pas varié d'une manière appréciable depuis plusieurs milliers d'années.

Unité de longueur. — L'unité de longueur est le *centimètre*, ou la 100ième partie du mètre. Le mètre est théoriquement la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre, c'est-à-dire la dix-millionième partie du résultat obtenu dans une mesure géodésique particulière.

Pratiquement, c'est la distance à 0° de deux traits gravés près

des bouts d'une barre-étalon de platine, construite avec le plus grand soin, il y a quelques années, sous la surveillance d'une Commission Internationale, et déposée à la Manufacture de Sèvres.

Cet étalon assure à l'unité de longueur un caractère de permanence incontestable. Des mesures géodésiques récentes et plus exactes ont manifesté une différence entre la longueur de l'étalon et la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre; mais l'unité de longueur n'a pas été changée. Elle est restée le mètre, tel qu'il a été fixé matériellement par Borda.

Unité de masse. — On prend pour unité de masse la *masse d'un centimètre cube d'eau distillée, prise au maximum de densité,* c'est-à-dire à 4° C. environ.

La valeur de cette unité est partout la même; mais son poids varie avec la position qu'elle occupe à la surface de la terre. On convient de lui donner le nom de *gramme*; dans ce cas on n'attache pas à ce mot l'idée d'une force, mais l'idée de la masse dont le poids est un gramme à l'altitude et à la latitude de Paris.

Pratiquement, l'unité de masse, ou le gramme, est figurée avec une très grande exactitude par des étalons de platine, conservés aux Archives.

Les trois unités fondamentales seront désignées par les trois lettres majuscules entre crochets : [L] longueur, [M] masse, [T] temps.

Le système coordonné absolu fondé sur elles s'appelle le *système absolu centimètre-gramme-seconde,* ou, par abréviation, *le système* C. G. S.

Les symboles [L], [M], [T] représentent respectivement les unités *concrètes* de longueur, de masse et de temps. Si l est la valeur numérique d'une longueur donnée, c'est-à-dire le nombre d'unités concrètes [L] qu'elle renferme, l'expression de cette longueur s'écrira l[L]. De même, un intervalle de temps déterminé sera représenté par le symbole t[T], t étant sa valeur numérique; enfin la masse d'une substance aura pour symbole m[M], où m est la valeur numérique de la masse en fonction de l'unité concrète [M].

3. **Unités dérivées.** — Quand il s'agit d'une unité dérivée, il est nécessaire de connaître la relation qui lie cette unité aux

trois unités fondamentales, afin de pouvoir calculer facilement le changement de valeur numérique qu'elle devrait subir si une ou plusieurs unités fondamentales étaient modifiées, si, par exemple, on passait du système C. G. S à un autre système.

Cette relation constitue ce qu'on nomme les *dimensions* de l'unité dérivée.

Lorsqu'une unité dérivée varie comme la $n^{ième}$ puissance d'une des unités fondamentales, on dit qu'elle est du degré n par rapport à cette unité. Par exemple, l'unité scientifique de volume est toujours le cube dont le côté est l'unité de longueur. Si l'unité de longueur varie, l'unité de volume variera comme la troisième puissance de l'unité de longueur, et l'on dira que l'unité de volume est du degré 3 par rapport à l'unité de longueur. De même l'unité de surface, variant comme la deuxième puissance de l'unité de longueur, sera du degré 2 par rapport à cette unité fondamentale.

Les dimensions de l'unité de volume seront représentées par le symbole $[L^3]$, et celles de l'unité de surface par le symbole $[L^2]$.

Dans le système C. G. S, l'unité de surface s'appelle *centimètre carré* et l'unité de volume *centimètre cube*.

Les dimensions d'une unité dérivée $[x]$ peuvent être généralement représentées par l'expression symbolique suivante :

$$[x] = [L^\alpha][M^\beta][T^\gamma];$$

$[x]$ est ici du degré α par rapport à $[L]$, du degré β par rapport à $[M]$ et enfin du degré γ par rapport à $[T]$.

La connaissance de ces relations fournit le moyen de vérifier aisément les équations qui résultent d'une investigation prolongée. En substituant aux diverses grandeurs, contenues dans chaque équation, leurs dimensions en fonction des unités fondamentales, on doit parvenir à une équation *homogène*, c'est-à-dire telle que chaque terme soit du même degré par rapport à chacune des trois unités fondamentales. S'il en était autrement, l'équation serait absurde et certainement affectée d'une erreur.

4. Unités mécaniques dérivées. Dimensions de ces unités. — Les principales unités dérivées sont en Mécanique la *vitesse*, l'*accélération*, la *force*, le *travail* ou l'*énergie*.

Unité de vitesse (V). — L'unité de vitesse est celle d'un mobile animé d'un mouvement uniforme, qui dans l'unité de temps parcourt un espace égal à l'unité de longueur.

En appelant V l'unité de vitesse, on a pour ses dimensions :

$$V = \frac{L}{T} = LT^{-1}.$$

Unité d'accélération (Γ). — L'unité d'accélération est celle d'un corps dont la vitesse croît de l'unité de vitesse pendant l'unité de temps; c'est par suite le quotient de l'unité de vitesse par l'unité de temps. Ses dimensions sont donc

$$\Gamma = \frac{V}{T} = [LT^{-2}].$$

L'accélération ou l'accroissement de vitesse dû à la pesanteur, pendant une seconde, a une valeur beaucoup plus considérable. Ainsi l'accélération d'un corps tombant en chute libre est environ $980^{cm},868$ à Paris; elle varie avec les latitudes : elle est égale à $978^{cm},1$ à l'Equateur, et à $983^{cm},1$ au Pôle Nord.

Unité de force (F). — L'unité de force est celle qui, dans l'unité de temps, imprime à l'unité de masse une accélération égale à l'unité de vitesse. Ses dimensions sont donc :

$$F = M\Gamma = [MLT^{-2}].$$

Cette unité de force a reçu le nom de *dyne;* elle est à peu près égale à la millième partie du poids d'un gramme. En effet, à Paris, la pesanteur imprime à l'unité de masse un accroissement de vitesse de $980^{cm},868$ par seconde; pour réduire cette vitesse à 1^{cm}, il faut une force égale à $\frac{1}{980,868} = 0^{gr},0010195$. A Paris, le poids d'un gramme représente 980,868 *unités absolues de force ou dynes.*

Unité de travail (𝔗). — L'unité de travail est le travail accompli par une dyne pendant un parcours du point d'application égal à 1^{cm} et mesuré dans la direction de la force.

L'unité de travail, étant le produit de l'unité de force par l'unité

de longueur, a pour ses dimensions

$$\mathfrak{T} = [ML^2T^{-2}].$$

On donne à cette unité de travail le nom d'*erg*.

L'erg est égal au travail nécessaire pour déplacer un corps de 1^{cm} quand la force contraire est une dyne. Puisque le poids d'un gramme à Paris est d'environ 980 dynes, le travail dépensé pour soulever 1^{gr} de 1^{cm} contre la force de la pesanteur est environ 980 *ergs*. L'erg est égal, si l'on a besoin d'une valeur plus exacte, à $\frac{1}{980,868}$ centimètre-gramme.

Unité d'énergie (W). — L'unité d'énergie est aussi l'erg; car l'énergie d'un corps est mesurée par le travail qu'elle est susceptible de produire.

Unité de chaleur (Q). — L'unité de chaleur est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1^{gr} d'eau de 0° à 1° C. Elle se nomme *Calorie*. On sait qu'une quantité de chaleur est équivalente à une quantité déterminée de travail : on peut donc poser

$$[Q] = J\,[\mathfrak{T}],$$

[Q] désignant la calorie et [$\mathfrak{T}$] l'erg; J est l'*équivalent mécanique* de l'unité de chaleur ou l'*équivalent de Joule*. Les expériences nombreuses qui ont été faites pour déterminer sa valeur ont fourni des chiffres qui varient un peu : on admet généralement 42 millions d'ergs, ce qui donne

$$[Q] = 42.10^6\,[\mathfrak{T}].$$

En effet on a trouvé que

$$1^{cal} = 425 \text{ grammes-mètres} = 42\,500 \text{ grammes-centimètres}.$$

En ergs, et puisque le gramme-centimètre égale 980 ergs,

$$1^{cal} \text{ vaut } 42500 \times 980 \text{ ergs} = 42\,000\,000 \text{ ergs}.$$

L'*équivalent calorifique absolu de l'unité de travail* $\frac{1}{J}$ est égal à

$$\frac{1}{42.10^6}.$$

L'équivalent calorifique du gramme-centimètre à Paris est rigoureusement égal à

$$\frac{1}{42.10^6 \times 0{,}001019}.$$

5. **Usage de ces dimensions.** — La connaissance des dimensions des diverses unités dérivées sert à résoudre le problème suivant : *une mesure étant exprimée en unités absolues du système* L′, M′, T′, *la convertir en unités absolues du système* **L, M, T.**

Il ne faut pas oublier que l'expression d'une grandeur se compose de deux facteurs; l'un est l'unité de même espèce que la grandeur, et l'autre est le coefficient numérique qui exprime combien de fois l'unité est contenue dans la grandeur mesurée. Cela posé, comparons successivement une grandeur déterminée et fixe aux deux unités U et U′ de même espèce et appartenant à deux systèmes différents; si l'on appelle n et n' les valeurs numériques respectivement obtenues, on a la relation évidente

$$n[\mathrm{U}] = n'[\mathrm{U}'],$$

d'où

$$\frac{n}{n'} = \frac{[\mathrm{U}']}{[\mathrm{U}]}.$$

Ainsi, la valeur numérique d'une quantité donnée varie en raison inverse de la grandeur de l'unité qui a servi à la mesure.

Supposons que le symbole des dimensions de cette unité soit généralement

$$[\mathrm{L}^\alpha][\mathrm{M}^\beta][\mathrm{T}^\gamma];$$

on aura, pour le rapport des valeurs de cette unité dans les deux systèmes,

$$\frac{[\mathrm{U}']}{[\mathrm{U}]} = \left[\frac{\mathrm{L}'}{\mathrm{L}}\right]^\alpha \left[\frac{\mathrm{M}'}{\mathrm{M}}\right]^\beta \left[\frac{\mathrm{T}'}{\mathrm{T}}\right]^\gamma,$$

d'où

$$n = n'\left[\frac{\mathrm{L}'}{\mathrm{L}}\right]^\alpha \left[\frac{\mathrm{M}'}{\mathrm{M}}\right]^\beta \left[\frac{\mathrm{T}'}{\mathrm{T}}\right]^\gamma.$$

Ainsi, *pour passer de la mesure d'une grandeur donnée dans le système* L′, M′, T′, *à la mesure de cette grandeur dans un*

autre système L, M, T, *on multipliera la valeur numérique n′ dans le premier système par les rapports inverses* $\frac{L'}{L}$, $\frac{M'}{M}$, $\frac{T'}{T}$ *des unités fondamentales, élevés à une puissance marquée par l'exposant de la lettre correspondante dans la formule qui donne les dimensions de l'unité.*

On voit que, pour résoudre le problème proposé, il suffit de connaître les rapports $\frac{L'}{L}$, $\frac{M'}{M}$, $\frac{T'}{T}$ pour chaque couple d'unités fondamentales.

On trouvera dans Jenkin des tables contenant les valeurs de ces rapports pour différents systèmes.

Exemple : 1° Convertir une vitesse exprimée en mesures anglaises (pied, grain, seconde) en une vitesse exprimée en mesures françaises (mètre, gramme, seconde). Dans ce cas la formule se réduit à $n = n'\left[\frac{L'}{L}\right]$; car $T' = T$. Les tables de Jenkin donnent $\frac{L'}{L} = 0,3048$; on multipliera donc le nombre qui exprime la mesure anglaise par le facteur 0,3048.

2° Convertir une mesure de force anglaise en mesure française. Dans ce cas la formule se réduit à $n = n'\left[\frac{L'}{L}\right]\left[\frac{M'}{M}\right]$ parce que $T' = T$. On cherchera dans les Tables le rapport $\frac{M'}{M}$ qui est 0,0648, et on multipliera la première mesure par le coefficient

$$0,3048 \times 0,0648 = 0,01975.$$

NOTE IV.

SUR LES LOIS DE COULOMB.

1. Après avoir reconnu le sens des forces électriques, on est naturellement conduit à rechercher les lois numériques suivant lesquelles s'exercent les attractions et les répulsions électriques.

Pour découvrir les lois élémentaires de ces actions, Coulomb a étudié les attractions ou répulsions réciproques de deux corps conducteurs électrisés, assez petits et assez éloignés l'un de l'autre pour que leur action pût être assimilée à celle de deux éléments électrisés. En ces circonstances, il est vrai, les forces à mesurer étaient peu considérables; mais Coulomb avait trouvé le moyen de les évaluer exactement, en leur opposant la faible réaction élastique que la torsion développe dans un fil métallique long et très mince. C'est ce fil qui servait de mesureur dans la *balance de torsion*.

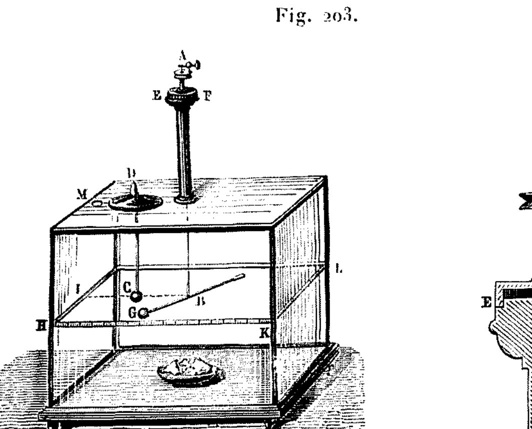
2. **Description de la balance de torsion.** — L'appareil se compose (*fig.* 203) d'une cage de verre, haute et large d'environ $0^m,30$, encastrée par sa partie inférieure dans un support de bois bien sec et muni de vis calantes. La cage est fermée à sa partie supérieure par un plateau de verre mobile; au centre de ce couvercle s'élève un tube de verre, d'une hauteur double de celle de la cage, qui porte à son sommet et le fil de métal AB et le *micromètre de torsion*.

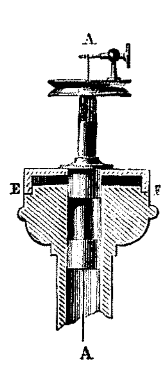
Le micromètre de torsion est composé de trois pièces : l'une est

une garniture mastiquée sur le tube de verre; la seconde, appelée souvent *cercle de torsion,* est formée d'un disque divisé sur sa tranche en 360°, et d'un tuyau de cuivre qui entre dans la garniture; la troisième est un bouton, qui peut tourner à frottement doux dans une cavité centrale du cercle de torsion et qui de plus est pourvu d'un index atteignant les divisions du disque.

Le fil AB est saisi à sa partie supérieure par une pince ou un

Fig. 203.





porte-crayon, attaché au bouton A et pouvant se serrer au moyen d'un anneau. Ce fil descend, suivant l'axe du tube, jusqu'au centre de la cage de verre; à sa partie inférieure, il porte une autre pince dans laquelle est engagée une aiguille horizontale BG; cette pince est assez lourde pour tendre le fil sans le rompre.

L'aiguille est suspendue à la moitié à peu près de la hauteur de la cage de verre; elle est formée d'une paille enduite de cire d'Espagne, portant à l'une de ses extrémités une balle de sureau dorée de $0^m,005$ à $0^m,006$ de diamètre. Par l'autre extrémité, l'aiguille soutient un petit disque vertical de papier, trempé dans l'essence de térébenthine, qui sert de contre-poids à la balle G et est destiné à amortir les oscillations.

Sur le pourtour de la cage, et dans le plan horizontal que l'ai-

guille peut décrire, se trouve collée une bande de papier HKL portant à droite et à gauche du zéro I des traits qui mesurent en degrés les angles d'écart CBG.

Sur le couvercle de verre, à une distance de son centre égale à la demi-longueur de l'aiguille, se trouve pratiquée une ouverture D par laquelle on peut introduire dans la balance une boule conductrice C soutenue à l'extrémité d'une tige isolante CD en gomme laque. On la nomme ordinairement la *boule fixe* de la balance; la boule G fixée à l'aiguille est la *boule mobile*. La longueur de la tige isolante est telle que les centres des deux boules amenées en contact se trouvent sur une même ligne horizontale. Enfin, à l'intérieur de la plaque, on place des substances desséchantes (chaux, chlorure de calcium), afin de rendre l'air aussi isolant que possible.

« Pour opérer avec cet instrument, dit Coulomb, je place l'index du micromètre supérieur au zéro du cercle de torsion; je fais ensuite tourner tout le micromètre dans le tube vertical, jusqu'à ce que, en regardant par le fil vertical qui suspend l'aiguille et par le centre de la balle, l'aiguille BG se trouve répondre au zéro de la graduation du papier. J'introduis ensuite par l'ouverture D la boule fixe C exactement en face de ce repère. J'écarte ainsi la boule mobile G du zéro d'un angle égal à la somme des rayons des deux boules, et la faible torsion qui en résulte dans le fil suffit pour maintenir les deux boules en contact. »

Dans toutes les expériences le fil d'argent doit passer par le centre de la division tracée sur la cage de verre. On s'assure que cette condition est remplie en vérifiant que, dans deux positions différentes de l'aiguille, il y a égalité entre les arcs qui séparent chacune de ses extrémités de la ligne 0-180. Les vis calantes du support servent à régler la position du fil métallique.

La balance est alors prête à toutes les opérations.

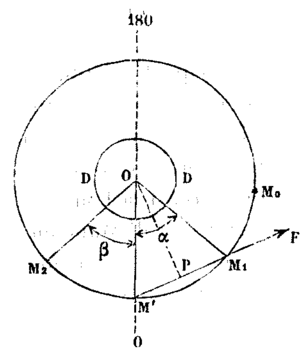
L'étude des répulsions ou des attractions comprend deux lois : la loi des distances et la loi des charges.

3. **Cas des répulsions.** — 1° *Loi des distances.* — Par le trou M du couvercle on introduit un petit corps chargé d'électricité et isolé; dans les expériences de Coulomb, ce *chargeur*

n'était autre chose qu'une épingle à grosse tête, enfoncée par sa pointe dans un bâton de cire d'Espagne. On touche avec le *chargeur* l'une des deux boules : elles s'électrisent toutes deux et se repoussent mutuellement. La boule mobile s'écarte du zéro d'un angle plus ou moins grand. Laissant le cercle de torsion en place, on tourne l'index du côté opposé à la déviation de l'aiguille; on augmente la torsion; la boule mobile se rapproche, et l'on mesure à la fois la distance angulaire des deux boules et l'angle de torsion. La distance angulaire se détermine en visant dans le plan vertical qui passe par le fil et l'aiguille.

Supposons une projection horizontale de l'appareil (*fig.* 204): la

Fig. 204.



boule fixe est représentée en M'; la boule mobile, électrisée au contact de la boule fixe, occupe originairement une position M_0.

Après qu'on a tourné l'index, la boule mobile a pris la position d'équilibre M_1; soient α l'angle d'écart, c'est-à-dire l'angle que fait l'aiguille OM_1 avec le rayon OM', et β l'angle lu sur le micromètre.

La distance des deux boules se calcule aisément; si l désigne le rayon du cercle décrit par la boule mobile, la distance M_1M' a pour valeur $2l\sin\frac{\alpha}{2}$. Pour avoir la torsion du fil, supposons un instant que la boule fixe M' soit enlevée; la boule mobile, en vertu de cette seule torsion du fil, serait venue de l'autre côté de la ligne 0-180, dans une position M_2 distante de cette ligne de l'angle β. La boule

mobile occupe en réalité la position M_1 : l'angle de torsion M_1OM_2 est donc égal à $\alpha + \beta$.

Comme les forces électriques sont extrêmement petites, le poids, même très faible, de l'étrier sera suffisant pour maintenir toujours le fil vertical et l'aiguille tournera autour d'un axe vertical fixe. Il est facile alors d'écrire la condition d'équilibre de l'aiguille mobile : le moment de la force répulsive F doit évidemment être égal au moment de torsion du fil. Or le moment de la force répulsive est $F \times OP = Fl \cos\frac{\alpha}{2}$, et le moment de torsion du fil est $c(\alpha + \beta)$, en désignant par c le moment de torsion pour un angle d'écart égal à l'unité. On a donc

$$(1) \qquad Fl \cos\frac{\alpha}{2} = c(\alpha + \beta).$$

On peut remarquer d'ailleurs que l'équilibre de la boule mobile M_1 est stable : en effet, si la boule mobile est rapprochée de la boule fixe M', la force de répulsion augmente en même temps que la torsion diminue ; la boule mobile est repoussée par la boule fixe vers la position M_1. Au contraire, si la boule mobile est éloignée de la boule fixe, la force de répulsion diminue en même temps que la torsion augmente ; la boule mobile est ramenée vers la position M_1.

Admettons maintenant la loi qu'il s'agit de vérifier, c'est-à-dire la loi de la raison inverse du carré des distances ; on peut poser

$$F = \frac{\varphi}{\overline{M_1M'}^2} = \frac{\varphi}{4l^2 \sin^2\frac{\alpha}{2}},$$

φ étant la force répulsive à l'unité de distance : l'équation (1) devient

$$\frac{\varphi \cos\frac{\alpha}{2}}{4l \sin^2\frac{\alpha}{2}} = c(\alpha + \beta),$$

ou, en isolant dans un membre tous les facteurs variables,

$$(\alpha + \beta) \sin\frac{\alpha}{2} \cdot \tang\frac{\alpha}{2} = \frac{\varphi}{4lc}.$$

Recommençons maintenant l'expérience, et soient α' et β' les nouvelles valeurs de la distance angulaire et de l'angle dont on a tourné l'index sur le cercle de torsion; on aura

$$(\alpha' + \beta') \sin \frac{\alpha'}{2} \cdot \tan \frac{\alpha'}{2} = \frac{\varphi}{4lc}.$$

Le second membre est constant pour une même balance : si la loi est vraie, l'expression

$$(\alpha + \beta) \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \tan \frac{\alpha}{2}$$

devra donc avoir une valeur constante.

Dans ses expériences où, après le contact, la boule mobile s'était écartée de 36°, Coulomb obtint les résultats suivants :

α.	$\alpha + \beta$.	$(\alpha + \beta) \sin \frac{\alpha}{2} \tan \frac{\alpha}{2}$.
36°	36°	3,614
18°	144°	3,568
$8°\frac{1}{2}$	$575°\frac{1}{2}$	3,557

Les nombres de la troisième colonne ne sont point égaux; mais leurs différences ne sont pas supérieures à celles que l'on peut attribuer aux erreurs possibles des expériences. Les deux boules perdent de l'électricité par leur contact avec l'air ou avec les supports; mais, comme l'a constaté Coulomb, cette cause d'erreur peut être considérée comme insensible dans les conditions de rapidité où l'on opère. Les différences des nombres obtenus tiennent surtout à la distribution inégale des fluides, due aux actions réciproques des charges des deux boules, quand celles-ci sont à de trop petites distances l'une de l'autre.

Abstraction faite de ces causes inévitables de perturbations, nous pouvons énoncer la loi suivante :

La répulsion de deux petites boules ou deux éléments maté-

riels électrisés est en raison inverse du carré des distances de leurs centres.

2° *Loi des charges ou des quantités.* — Pour étudier la loi suivant laquelle varient les répulsions électriques avec les charges d'électricité mises en présence, il faut d'abord définir ce qu'on entend par une charge ou quantité d'électricité, et savoir comment on la mesure.

La notion de quantité d'électricité nous est fournie par l'observation de phénomènes purement mécaniques.

Suivant qu'une quantité d'électricité est plus ou moins grande, l'action qu'elle exerce sur une autre quantité d'électricité maintenue constante est elle-même plus ou moins grande. Supposons, par exemple, qu'on approche d'un pendule électrique un corps chargé de la même électricité que le pendule : une répulsion se manifeste par un certain écart angulaire du pendule. Si l'on communique au même corps une charge différente, et qu'on l'approche du pendule en le plaçant à la même distance, on constate en général un écart différent du pendule, c'est-à-dire l'existence d'une force de répulsion différente. Pour mesurer des quantités d'électricité, il faut mesurer les forces relatives qui naissent dans les mêmes circonstances. Si une quantité d'électricité M produit une force double, triple, etc., de celle que produit la quantité M′ dans des circonstances absolument semblables, on est fondé à dire que la quantité M est double, triple, etc., de la quantité M′.

Nous indiquerons plus loin l'unité que l'on adopte pour la mesure des quantités électriques.

Il est d'ailleurs facile d'obtenir expérimentalement des charges électriques égales : on prendra deux boules conductrices, identiques et isolées, dont l'une soit électrisée et l'autre à l'état neutre, et on les mettra en contact. En les portant ensuite tour à tour dans la balance de Coulomb, on reconnaîtra qu'elles exercent des répulsions égales sur la boule fixe, dont l'état électrique est supposé constant.

Ceci posé, déterminons la relation qui existe entre la force répulsive et les charges des boules.

La boule fixe et la boule mobile étant en contact, on les électrise. Soient α la distance angulaire de ces boules après leur répulsion

mutuelle et β la lecture faite sur le cercle de torsion. La force répulsive est mesurée, d'après l'équation (1), par

$$F = \frac{c}{l}\,\frac{\alpha+\beta}{\cos\frac{\alpha}{2}}.$$

On touche ensuite la boule fixe avec une boule identique, à l'état neutre et isolée ; la charge électrique de la première est diminuée de moitié et la boule mobile se rapproche de la boule fixe. On détourne alors l'index du micromètre supérieur, de façon à ramener la boule mobile à la même distance angulaire α ; soit β' le nouvel angle qui sépare l'index du micromètre de son zéro.

La force répulsive est dans ce second cas

$$F' = \frac{c}{l}\,\frac{\alpha+\beta'}{\cos\frac{\alpha}{2}},$$

d'où

$$\frac{F'}{F} = \frac{\alpha+\beta'}{\alpha+\beta}.$$

L'expérience donne pour la valeur du second rapport, la fraction $\frac{1}{2}$. Or, la charge de la boule mobile étant supposée constante, celle de la boule fixe est m dans le premier cas et $\frac{m}{2}$ dans le second.

On peut donc énoncer la proposition suivante :

La répulsion qui s'exerce entre deux éléments matériels électrisés, placés à une distance constante, est proportionnelle la charge électrique de ces éléments.

4. **Cas des attractions.** — 1° *Loi des distances.* — Après avoir enlevé la boule fixe, on commencera par électriser négativement la boule mobile au moyen de la tête d'épingle isolée ; puis on l'écartera du zéro d'un angle β en tournant du même angle l'index du micromètre supérieur. On introduira ensuite dans l'appareil la boule fixe électrisée positivement : la boule mobile, étant attirée, se rapprochera du zéro, de manière à réduire la déviation à une valeur plus petite α et par suite à tordre le fil de l'angle β — α. L'aiguille *pourra* se maintenir en équilibre, si l'attraction électrique

est contrebalancée par la torsion du fil, c'est-à-dire si l'équation

$$(2) \qquad F\, l \cos\frac{\alpha}{2} = c(\beta - \alpha)$$

est satisfaite.

Lorsqu'on suppose l'arc α assez petit pour qu'on puisse le confondre avec sa corde, on peut remplacer F par $\frac{\varphi}{l^2\alpha^2}$ et $\cos\frac{\alpha}{2}$ par 1, et l'équation précédente devient, si l'on admet que l'attraction est en raison inverse du carré de la distance,

$$(3) \qquad \frac{\varphi}{l\alpha^2} = c(\beta - \alpha).$$

On connaît β; si l'on mesure α, la différence $\beta - \alpha$ sera déterminée. Cette première expérience faite, on tourne ou l'on détourne le micromètre supérieur pour faire varier à la fois la torsion et la distance; l'expérience prouve que les nombres obtenus successivement pour $\beta - \alpha$ sont en raison inverse du carré des valeurs correspondantes de α; d'où l'on conclut que l'attraction entre deux éléments chargés de fluides contraires varie suivant la même loi que la répulsion entre deux éléments chargés du même fluide.

Ces dernières observations présentent une difficulté pratique qui n'existait pas dans les expériences destinées à mesurer la répulsion.

D'abord, pour que l'équilibre puisse se produire et que l'expérience ait chance de réussir, il faut que la torsion initiale β et les charges initiales des deux boules soient telles qu'on ait

$$\frac{\varphi}{lc} = \alpha^2(\beta - \alpha).$$

Or le second membre est susceptible d'un maximum, dont la valeur est atteinte lorsque

$$\beta - \alpha = \frac{\alpha}{2},$$

c'est-à-dire lorsque

$$\alpha = \frac{2}{3}\beta.$$

Cette valeur maximum est égale à

$$\frac{4}{27}\beta^3.$$

La valeur correspondante du moment de la force attractive est

$$\frac{\varphi}{l.\frac{4}{9}\beta^2};$$

celle du moment de la force de torsion est

$$c.\frac{1}{3}\beta.$$

Pour que l'équilibre soit possible, il faut qu'on ait donné à l'angle initial β une valeur telle que

$$\frac{\varphi}{lc} \leqq \frac{4}{27}\beta^3;$$

sinon le moment de la force attractive est plus grand que le moment de la force de torsion, et la boule mobile se précipite sur la boule fixe; il y a contact de ces boules.

D'autre part, en supposant cette condition satisfaite, y aura-t-il une position d'équilibre stable? Cela n'est pas évident *a priori*. Car, si l'on éloigne la boule mobile de la boule fixe, la torsion diminue en même temps que l'attraction; au contraire, si l'on rapproche la boule mobile de la boule fixe, la torsion augmente en même temps que l'attraction. On ne peut donc rien conclure sur la stabilité de l'équilibre obtenu.

Pour nous éclairer, nous aurons recours à la construction géométrique suivante :

Le moment de la force attractive a pour valeur

$$y_1 = \frac{\varphi}{l\alpha^2} = \frac{k}{\alpha^2},$$

et le moment de la force de torsion est

$$y_2 = c(\beta - \alpha).$$

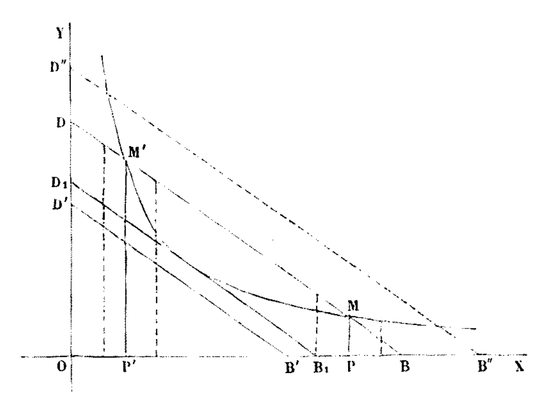
Prenons deux axes rectangulaires OX et OY (*fig.* 205); le moment de la force attractive y_1 peut se représenter par l'ordonnée d'une courbe ayant pour abscisses les distances angulaires α portées sur l'axe OX. Cette courbe, pour les valeurs positives de α, qui sont

seules à considérer physiquement, a une branche hyperbolique dont les asymptotes sont les axes de coordonnées.

Le moment du couple de torsion y_2 est l'ordonnée d'une droite BD, dont le coefficient angulaire est la constante c et dont l'abscisse à l'origine est OB $= \beta$.

Avec une balance donnée, c'est-à-dire avec une valeur donnée du coefficient de torsion c, la position de la droite dépend de l'angle

Fig. 205.



d'écart initial β du micromètre; la position de la courbe dépend des conditions d'établissement de la balance et des charges initiales des deux boules. Selon les valeurs relatives de β et de φ, la droite et la courbe pourront avoir l'une par rapport à l'autre trois positions :

1° La droite B′D′ et la courbe ne se coupent pas ; alors y_2 n'est jamais égal à y_1; le moment du couple de torsion ne peut jamais valoir celui de la force attractive. Il n'y a pas d'équilibre possible.

2° La droite BD et la courbe se coupent en deux points M et M dont les abscisses sont OP et OP′. Pour chacune de ces valeurs de α, on a $y_1 = y_2$ et il y a équilibre; mais il faut distinguer et examiner les propriétés de ces deux points d'intersection.

L'abscisse OP, qui correspond au point M, donne lieu à une

position d'équilibre stable. En effet, si l'on suppose que la boule mobile s'éloigne de la boule fixe, l'abscisse α augmente; l'ordonnée de la courbe est supérieure à l'ordonnée de la droite; la force attractive l'emporte sur la torsion, et la boule mobile est ramenée vers sa position d'équilibre. Si l'on suppose que la boule mobile se rapproche de la boule fixe, l'abscisse α diminue; l'ordonnée de la courbe est inférieure à l'ordonnée de la droite; l'attraction est plus faible que la force de torsion, et la boule mobile est encore ramenée vers sa position d'équilibre.

Au point d'intersection M', qui a pour abscisse OP', correspond une position d'équilibre instable et par suite irréalisable. En effet, si l'abscisse augmente, la torsion l'emporte sur l'attraction et la boule mobile s'écarte de la boule fixe. Si l'abscisse diminue, l'attraction l'emporte sur la torsion et la boule mobile est amenée vers la boule fixe.

Dans la pratique, les deux boules se touchent souvent, même pour la valeur de β qui donne l'équilibre possible; cela tient à l'extrême flexibilité de la suspension de l'aiguille qui lui permet d'exécuter des oscillations d'amplitude trop étendue. L'amplitude doit être inférieure à PP', sans quoi l'aiguille sortirait du champ de l'équilibre stable.

3° La droite est tangente à la courbe; il n'y a dans ce cas qu'une seule position d'équilibre, et celle-ci est, d'après ce qui précède, une position d'équilibre instable. C'est d'ailleurs un cas limite qui ne présente aucun intérêt au point de vue expérimental.

Il est facile de reconnaître qu'on obtiendra toujours une position d'équilibre stable, si l'on prend l'angle β suffisamment grand. En effet, quand on donnera à cet angle des valeurs supérieures à $OB_1 = \beta_1$, la droite B_1D_1 se déplaçant parallèlement à elle-même coupera toujours la courbe en deux points dont l'un correspondra nécessairement à une position d'équilibre stable.

Dans ses expériences, Coulomb tendait verticalement dans la balance et près de la boule fixe un fil de soie qui arrêtait l'aiguille et l'empêchait de se précipiter sur la boule fixe. Mais il arrivait souvent que l'aiguille de gomme laque s'attachait au fil de soie : de

là un tâtonnement pendant lequel « *on perdait à la fois du temps et de l'électricité.* »

2° *Loi des charges.* — L'équation (2) obtenue ci-dessus

$$F\,l\cos\frac{\alpha}{2} = c(\beta - \alpha)$$

donne

$$F = \frac{c}{l}\,\frac{\beta - \alpha}{\cos\frac{\alpha}{2}}.$$

La force attractive F qui s'exerce entre les deux boules est donc mesurée proportionnellement par le rapport

$$\frac{\beta - \alpha}{\cos\frac{\alpha}{2}}.$$

Dans cette expression, β est l'angle lu sur le micromètre, et α la distance angulaire des deux boules dans la position d'équilibre. Cette expérience faite, on touche la boule fixe avec une autre boule égale, conductrice, isolée et à l'état neutre; quand on enlève cette dernière, la charge de la boule fixe se trouve réduite de moitié, et l'écart des deux boules augmente. On tourne l'index du micromètre de manière à ramener la boule mobile à la distance primitive α de la boule fixe, et on lit sur le micromètre un nouvel angle β'. La force attractive a pour mesure proportionnelle $\frac{\beta' - \alpha}{\cos\frac{\alpha}{2}}$.

Or, l'expérience apprend que l'angle de torsion $\beta' - \alpha$ est la moitié de l'angle de torsion $\beta - \alpha$. La force attractive qui s'exerce entre deux éléments électrisés est donc réduite de moitié lorsque la charge de l'une des boules est réduite de moitié.

En général, la distance restant constante, *la force attractive entre deux éléments électrisés est proportionnelle à la charge de chacun de ces éléments.*

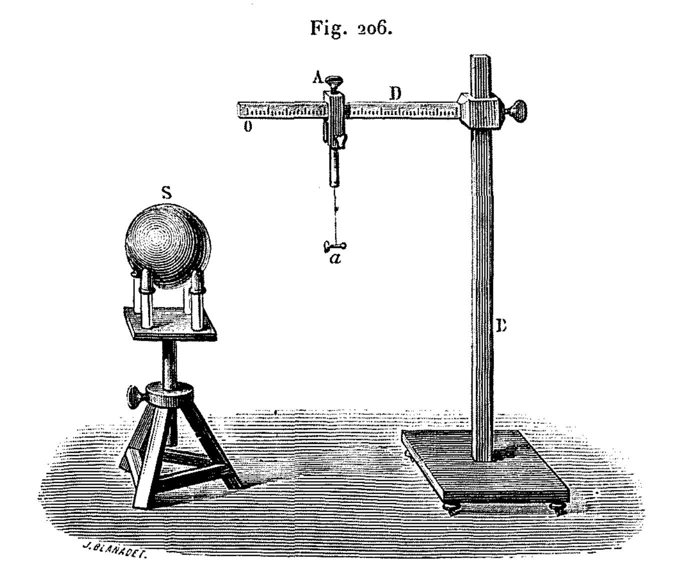
On voit que les attractions et les répulsions sont régies par les mêmes lois.

5. **Méthode des oscillations.** — Pour confirmer ces résultats, Coulomb entreprit une nouvelle série d'expériences. Le procédé tout à fait différent auquel il eut recours repose sur le principe suivant :

Une sphère électrisée agit sur un point extérieur électrisé de la même manière que si la charge électrique de cette sphère était concentrée en son centre.

Soit (*fig.* 206) un globe creux S de cuivre ou de carton recouvert

Fig. 206.



d'étain, et de grandes dimensions (1 pied de diamètre); ce globe est porté par quatre piliers de verre terminés par de petits cylindres de cire d'Espagne, afin que l'isolement soit plus parfait; une vis de pression permet de fixer à la hauteur convenable une tablette à coulisse qui sert de base aux piliers.

Quant au point extérieur électrisé sur lequel le globe doit agir, Coulomb le réalise en fixant un petit disque de papier doré très mince, de 7 lignes de diamètre, à l'extrémité d'une aiguille *a* en gomme laque et perpendiculairement à sa direction. L'aiguille avait 15 lignes de longueur et était suspendue horizontalement à

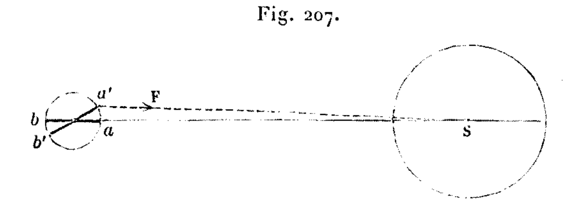
un fil de soie d'un seul brin, tel qu'il sort du cocon. Ce fil, long de 8 pouces, était attaché à l'extrémité inférieure d'une petite baguette de verre enduite de gomme laque, et cette dernière était saisie par une poupée à pince A qui pouvait couler le long de la règle divisée OD et s'arrêter à volonté au moyen d'une vis de pression. Enfin la règle divisée elle-même glissait verticalement le long du pied de la potence B.

Supposons qu'on veuille vérifier la loi des distances dans le cas des attractions électriques.

On dispose d'abord l'aiguille et le globe, de façon que l'axe de l'aiguille passe par le centre du globe. On charge le globe avec l'étincelle électrique d'une bouteille de Leyde ; on touche ensuite le disque avec un conducteur relié au sol ; l'influence du globe charge le disque d'électricité contraire. Quand on retire le conducteur, le globe et le disque agissent l'un sur l'autre par attraction. En approchant alors le doigt de l'aiguille, celle-ci entre en mouvement et exécute de part et d'autre de sa position d'équilibre des oscillations auxquelles on ne laisse qu'une faible amplitude pour qu'elles soient isochrones.

D'après le principe énoncé plus haut, le disque de papier est sollicité suivant a'S (*fig.* 207) par une force F, dont la direction et

Fig. 207.



l'intensité varient pendant le mouvement oscillatoire de l'aiguille. Mais si la distance du disque au globe est très grande par rapport à la longueur de l'aiguille, et si en outre les oscillations n'ont qu'une très faible amplitude, on peut admettre que le disque est sollicité par une force constante en grandeur et en direction ; dès lors les oscillations de l'aiguille suivront les mêmes lois que celles du pendule géodésique (Note I).

On aura donc, pour la durée T de n oscillations,

$$T = n\pi\sqrt{\frac{I}{Fl}};$$

π désigne le rapport de la circonférence au diamètre;
l la distance du centre du disque au centre de l'aiguille ou au fil de suspension;
I le moment d'inertie de l'aiguille par rapport à l'axe de suspension représenté par le fil de cocon;
F la force attractive exercée sur le petit disque électrisé.

On déduit de cette formule :

$$F = \frac{n^2\pi^2}{l}\,\frac{I}{T^2};$$

d'où

$$FT^2 = \text{constante}.$$

L'attraction du globe électrisé sur le disque est inversement proportionnelle au carré de la durée des n oscillations.

Cela posé, éloignons ou rapprochons l'aiguille à des distances différentes D, D', D'', ..., du centre de la sphère, et déterminons chaque fois les temps T, T', T'',... , nécessaires à l'accomplissement de n oscillations. On a la suite d'égalités

$$FT^2 = F'T'^2 = F''T''^2 = \ldots.$$

Or, l'expérience montre que ces temps T, T', T'',... sont proportionnels aux distances D, D', D'', ..., c'est-à-dire que

$$\frac{T}{D} = \frac{T'}{D'} = \frac{T''}{D''} = \ldots.$$

On en conclut *que les forces attractives qui s'exercent entre deux masses électriques constantes sont en raison inverse du carré de la distance.*

Coulomb comptait les durées T à l'aide d'un chronomètre, et mesurait les distances D sur la règle divisée OD. A cet effet, il amenait le disque en contact avec le globe et lisait la division de la règle où s'arrêtait la pince A dans cette position. Puis il éloignait l'aiguille, et une seconde lecture lui donnait la distance du disque

à la surface du globe; il fallait y ajouter le rayon du globe pour avoir la distance au centre de ce dernier.

Le tableau suivant contient les durées observées et calculées de 15 oscillations, lorsque le disque est à différentes distances du centre du globe :

Distance du disque au centre du globe.	Durée de 15 oscillations	
	observée.	calculée.
9 pouces.	20″	20″
18 »	41″	40″
24 »	60″	54″

On peut remarquer qu'il y a des différences entre le calcul et l'observation. Elles sont dues aux causes perturbatrices déjà signalées, c'est-à-dire à la déperdition de l'électricité par l'air ou les supports et surtout à la distribution inégale des fluides à diverses distances.

Il est bien évident que l'on pourrait vérifier aussi par la méthode des oscillations la loi des masses électriques et la loi des répulsions. Dans ce dernier cas, il suffirait de charger le globe et le disque d'électricités de même nom : l'aiguille se retournerait sur elle-même de 180° et le disque électrisé se placerait à l'extrémité la plus éloignée du globe. L'aiguille oscille encore suivant la même loi. A ce sujet, Coulomb a reconnu que toutes les expériences dans lesquelles on fait agir l'électricité par sa force répulsive s'exécutent au moyen de la balance d'une manière plus simple, plus exacte et plus commode.

6. **Expériences postérieures à celles de Coulomb.** — Les lois de Coulomb ont été vérifiées, depuis le commencement de ce siècle, par un grand nombre de physiciens et, en particulier, par M. Harris en Angleterre, M. Riess en Allemagne et M. Marié-Davy en France.

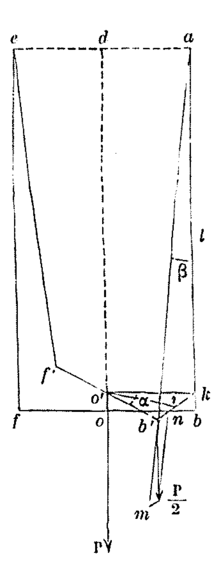
En 1836, M. Harris mit en doute les lois de Coulomb, en leur opposant les résultats d'expériences exécutées avec un appareil très ingénieux et très sensible, mais dans des conditions singulièrement défavorables.

Cet appareil est une balance nouvelle dans laquelle les forces

électriques sont équilibrées, non par la torsion d'un fil, mais par la pesanteur. A cet effet, l'aiguille, qui porte à l'une de ses extrémités le corps électrisé mobile, est suspendue par deux *fils* de cocon, parallèles et très rapprochés l'un de l'autre, au lieu du fil métallique unique employé par Coulomb. Il est facile de voir comment ce mode de suspension, connu sous le nom de *suspension bifilaire*, permet d'évaluer la grandeur du couple qui fait tourner l'aiguille.

Soient b et f les deux points auxquels les fils suspenseurs ab et ef

Fig. 208.



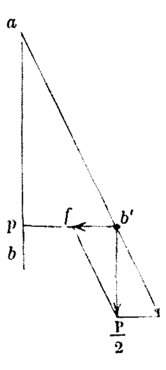
s'attachent à cette aiguille, a et e les extrémités supérieures de ces fils, qui sont fixés à une tige rigide ae. S'il est laissé à lui-même, c'est-à-dire s'il n'est soumis à aucune force extérieure, ce système est en équilibre lorsque les deux fils sont tendus parallèlement l'un à l'autre dans un même plan vertical contenant l'aiguille et la tige. Dans cet état naturel d'équilibre, on peut remplacer le poids P de l'aiguille par deux forces égales à $\frac{P}{2}$, appliquées l'une

en b, l'autre en f, et représentant la tension de chacun des fils.

Supposons que le système se dévie sous l'influence d'une force extérieure F; les fils prennent des positions obliques ab' et ef'; l'aiguille est nécessairement soulevée, mais seulement d'une très petite quantité, et l'influence de la pesanteur tend à la ramener à sa position primitive. Soit θ l'angle dont l'aiguille a tourné en s'arrêtant en $b'f'$. La force $\frac{P}{2}$ appliquée en b' peut être décomposée en deux autres, l'une dirigée suivant ab' et ayant pour effet de tendre le fil, l'autre horizontale f située dans le plan vertical abb'. La même décomposition de forces a lieu au point f'; les deux composantes horizontales ainsi obtenues sont égales, parallèles et opposées; elles constituent un couple. Pour qu'il y ait équilibre, il faut que le moment de la force extérieure soit égal et contraire au moment du couple ff par rapport à un axe vertical mené par le milieu o de bf supposé fixe.

Afin d'estimer la force f, prenons (*fig.* 209) le plan abb' pour plan

Fig. 209.



de la figure et abaissons du point b' sur la verticale ab une perpendiculaire $b'p$ qui sera la direction de la force f.

La composante f est donnée par la proportion

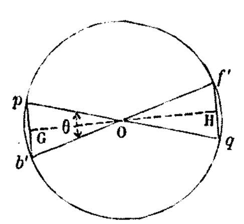
$$\frac{f}{\frac{P}{2}} = \frac{b'p}{ap},$$

d'où

$$f = \frac{P}{2} \frac{b'p}{ap}.$$

Supposons qu'on abaisse pareillement la perpendiculaire $f'q$ sur la verticale ef, et considérons le cercle horizontal, qui passe par les quatre points b', f', p, q (*fig.* 210) et dont le centre se pro-

Fig. 210.



jette en O; on a

$$b'p = 2\,Ob' \sin\frac{\theta}{2}.$$

Donc, en appelant d la demi-distance ab' des fils et posant $ap = h$, il vient

$$f = \frac{P}{2} \frac{2d}{h} \sin\frac{\theta}{2}.$$

Par suite, le moment du couple des deux forces f a pour valeur

$$f.\mathrm{GH} = 2P \frac{d^2}{h} \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{\theta}{2} = P \frac{d^2}{h} \sin\theta.$$

La distance $2d$ des deux fils étant supposée très petite par rapport à leur longueur l, on peut, surtout si θ est faible, regarder h comme constant et égal à cette longueur même, et écrire

$$(1) \qquad f.\mathrm{GH} = P \frac{d^2}{l} \sin\theta.$$

Dans la rotation du système, le fil a éprouvé une légère torsion : mais cette réaction de torsion est absolument négligeable quand on emploie des fils de cocon. Si, de plus, l'angle θ est assez petit pour qu'on puisse confondre le sinus avec l'arc, on pourra regarder le moment du couple ff comme proportionnel à l'angle d'écart θ,

et l'appareil bifilaire oscillera comme un pendule géodésique.

Le moment de la force extérieure qui fait équilibre au système, dévié de l'angle θ, a ainsi pour valeur

$$\frac{P}{l} d^2 \theta;$$

on voit que le coefficient $\frac{P}{l} d^2$ est le moment du couple directeur de l'aiguille pour un angle d'écart égal à l'unité.

La durée des oscillations du système sera donnée par la formule

$$t = \pi \sqrt{\frac{I}{P \frac{d^2}{l}}},$$

où I est le moment d'inertie du corps suspendu (aiguille et accessoires). Dans son traité, Jenkin a indiqué (p. 160) comment on parvient à déterminer I par l'expérience; mais on peut toujours poser

$$I = \frac{P}{g} \rho^2,$$

P étant le poids et ρ le rayon de gyration du corps; ce qui donne

$$t = \pi \sqrt{\frac{\frac{P}{g} \rho^2}{\frac{P}{l} d^2}} = \pi \frac{\rho}{d} \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Ainsi *la durée t de l'oscillation est proportionnelle à la racine carrée de la longueur des fils et en raison inverse de leur distance.*

La suspension bifilaire paraît présenter un certain avantage sur la suspension unifilaire adoptée par Coulomb, en ce sens qu'elle permet de graduer la sensibilité de l'appareil. Il résulte, en effet, de la formule (1) que, pour une même intensité de la force extérieure agissant sur le système mobile, la déviation θ, c'est-à-dire la sensibilité, est proportionnelle à la longueur des fils de suspension, et en raison inverse du poids de l'aiguille et du carré de la distance des deux fils. Dans la balance de Coulomb, la sensibilité est indépendante du poids de l'aiguille et ne dépend que de la

nature du fil. Ces propriétés précieuses de la suspension bifilaire ont reçu de nombreuses applications (électromètre de Thomson et électrodynamomètre de Weber).

Si M. Harris a fait usage d'un appareil précis, il faut reconnaître d'autre part qu'il n'a pris aucune précaution pour protéger sa balance contre l'influence perturbatrice des corps électrisés extérieurs; au lieu de recourir aux sphères électrisées de Coulomb dont l'action était équivalente à celle d'éléments de même charge placés à leur centre, il adoptait pour les corps agissant des formes mal choisies au point de vue de la distribution électrique, par exemple des disques munis de cônes sur leurs faces postérieures, en sorte que la déperdition électrique se trouvait notablement accrue. Il ne faut donc pas s'étonner que ses expériences aient été souvent en désaccord avec celles de Coulomb.

D'ailleurs, la contradiction des résultats de M. Harris avec les lois de Coulomb n'est qu'apparente; les propositions que le physicien anglais a formulées, inexactes dans leur objet et leur signification immédiate, sont pourtant des conséquences plus ou moins directes de ces mêmes lois, si l'on tient compte de l'influence apportée par la forme des corps et par la distribution compliquée des charges électriques, qui résulte de cette forme.

Les expériences plus récentes de MM. Riess et Marié-Davy ont infirmé les résultats de M. Harris.

7. **Expression des lois de Coulomb. Unité de quantité d'électricité.** — Les lois de Coulomb sont toujours vérifiées pour des corps électrisés de dimensions très petites par rapport à la distance qui les sépare. Ce sont des lois *élémentaires*, c'est-à-dire des lois rigoureusement exactes pour des éléments électrisés.

Soient q et q' les masses électriques contenues sur deux corps de dimensions infiniment petites placés à la distance r, et f la force qui agit entre ces corps. Les lois élémentaires de Coulomb peuvent être exprimées par la formule

$$f = \varphi \frac{qq'}{r^2}$$

où φ est un coefficient constant représentant la force qui s'exerce

entre deux masses électriques égales à l'unité, placées à l'unité de distance. On peut prendre pour *unité* une quantité arbitraire d'électricité : la constante φ dépend alors du choix de cette unité. Il y a simplicité à poser $\varphi = 1$, ce qui conduit à la définition suivante de l'unité de quantité :

L'unité de quantité d'électricité est la quantité qui, concentrée en un point, repousse avec l'unité de force (dyne) une quantité égale et de même signe concentrée en un point distant du premier de l'unité de longueur (centimètre).

L'unité de quantité ainsi choisie est appelée unité *électrostatique* absolue, pour la distinguer de l'unité *électromagnétique*.

Nous pouvons maintenant écrire la loi générale des actions électriques sous la simple forme

$$f = \frac{qq'}{r^2}.$$

La répulsion entre deux petits corps respectivement chargés de q et q' unités d'électricité est numériquement égale au produit des charges divisé par le carré de la distance.

Si q et q' sont de même signe, le second membre est positif et la force est répulsive; si q et q' sont de signes contraires, le second membre est négatif et la force est attractive.

8. **Dimensions de l'unité électrostatique de quantité.** — Soient [Q] l'unité électrostatique concrète de quantité, q et q' les valeurs numériques de deux quantités particulières; si l'on appelle [L] l'unité de longueur et r la valeur numérique de la distance, [F] l'unité de force, et f la valeur numérique de la force, l'équation précédente devient

$$f[\mathrm{F}] = \frac{qq'}{r^2}[\mathrm{Q}^2][\mathrm{L}^{-2}];$$

d'où

$$\mathrm{Q} = [\mathrm{L}][\mathrm{F}^{\frac{1}{2}}] = [\mathrm{L}^{\frac{3}{2}}\mathrm{M}^{\frac{1}{2}}\mathrm{T}^{-1}],$$

en remplaçant l'unité de force par ses dimensions et supprimant dans les deux membres les facteurs numériques nécessairement égaux.

NOTE V.

SUR LA DÉPERDITION DE L'ÉLECTRICITÉ.

1. Dans les expériences qui servent à vérifier les lois de Coulomb, il importe de tenir compte de la rapidité avec laquelle se dissipe l'électricité que l'on développe ou que l'on dépose sur les corps conducteurs, même quand ils sont soutenus par des supports isolants; c'est là en effet une cause d'erreur considérable.

La déperdition de l'électricité sur les conducteurs isolés se fait par les supports et par l'air.

On ne connaît aucune substance qui isole parfaitement l'électricité; celles que l'on nomme *isolantes*, telles que le verre, la cire d'Espagne, la gomme laque, ne sont que des substances conduisant mal l'électricité. Pour s'en assurer, il suffit de toucher le conducteur d'une machine électrique avec un cylindre formé par un de ces corps. On constate qu'au bout d'un certain temps le cylindre s'est électrisé dans toute sa longueur; la charge est considérable à l'extrémité mise en contact avec le conducteur et diminue continuement jusqu'à l'extrémité opposée.

En second lieu, l'air même parfaitement *sec* enlève de l'électricité aux conducteurs qui y sont plongés. On peut admettre que la perte a lieu par l'air comme par les isoloirs, c'est-à-dire qu'elle est le résultat d'une conductibilité propre des gaz, analogue à celle des solides et des liquides; elle peut encore se produire de la

manière plus compliquée qui suit : chaque molécule d'air, située dans le voisinage d'un corps électrisé, est attirée par lui, vient se mettre en contact avec sa surface, s'y électrise et est ensuite repoussée ; une nouvelle molécule la remplace, et enlève au corps une nouvelle quantité d'électricité, et ainsi de suite. La déperdition électrique, par l'intermédiaire de l'air, devra donc augmenter avec la charge du corps et aussi avec le temps.

La perte est surtout très rapide, lorsque le temps est humide, soit parce qu'une atmosphère chargée de vapeurs est conductrice de l'électricité, soit parce que les supports isolants recouverts de buée offrent à l'électricité un facile écoulement vers le sol.

Dufay avait déjà remarqué ces propriétés conductrices de l'eau et de la vapeur d'eau. Aussi recommande-t-il de frotter soigneusement les supports isolants avec des étoffes chaudes et sèches, et de dessécher à l'aide de substances convenables l'air au sein duquel s'effectuent les expériences.

Quelles que soient les précautions prises, les pertes par l'air et par les supports subsistent. Si l'on veut obtenir des résultats plus précis dans les expériences qui exigent un certain temps, il est nécessaire de connaître les lois de ces déperditions.

2. **Expériences de Coulomb.** — Pour éliminer l'influence de la perte par les supports, Coulomb chercha d'abord s'il y a des supports capables d'isoler aussi bien que l'air. Aucun isoloir ne lui parut satisfaire à cette condition ; mais, afin de s'en rapprocher suffisamment, il choisit des supports tels que la perte, le long de leur surface, pût être considérée comme négligeable par rapport à celle qui s'effectuait au contact de l'air ambiant.

Il avait remarqué que si l'on touche un conducteur, qui n'est pas très fortement chargé, avec de très minces aiguilles de gomme laque, ces aiguilles, même après un long contact, ne paraissaient électrisées qu'à une très petite distance de l'extrémité par laquelle elles communiquaient à la source ; un peu plus loin, elles étaient complètement à l'état naturel. Dès lors Coulomb pensa que de faibles charges électriques pourraient être isolées complètement par des supports en gomme laque, très minces et d'une suffisante longueur ; l'expérience a vérifié cette conjecture. Pour recon-

naître qu'un support donné satisfait à cette condition, on opère comme il suit :

Dans la balance de torsion, on soutient la boule fixe par l'intermédiaire du support que l'on veut étudier; on charge l'appareil à la manière ordinaire et l'on amène la boule mobile à une distance déterminée α de la boule fixe, en donnant au fil une torsion convenable. Puis on observe à des intervalles de temps égaux, de minute en minute par exemple, la diminution de la force répulsive; en d'autres termes, on cherche de quel angle, au bout de chaque minute, il faut détordre le fil pour maintenir les boules à la distance constante α et l'on enregistre dans un tableau les résultats obtenus.

Cela fait, on soutient la boule fixe par deux ou trois isoloirs identiques au premier et, recommençant l'expérience, on cherche de même la loi du décroissement progressif de la répulsion entre les deux boules à la même distance angulaire α. Si la répulsion ne décroît pas plus vite dans le second cas que dans le premier, on doit conclure que les supports n'exercent aucune influence sur le phénomène de la déperdition; la boule fixe perd son électricite dans l'atmosphère de la cage comme si elle y était plongée tout entière, sans support pour la maintenir. On dit alors que les isolants sont *parfaits*.

Par ces essais préliminaires, Coulomb a reconnu qu'un fil de verre, même relativement très long, isole mal dans les jours secs et pas du tout dans les temps humides; qu'un fil de soie recouvert de cire d'Espagne isole mieux que le verre, et que le meilleur de tous les isolateurs est la gomme laque brune. En particulier il constata qu'une mince aiguille de gomme laque, de $0^m,001$ de diamètre et de $0^m,045$ de longueur, suffisait pour isoler une balle de sureau de $0^m,010$ à $0^m,012$ de diamètre, c'est-à-dire de même dimension que celle de la balance. Dès lors il employa constamment dans ses expériences, comme supports de la boule fixe et de la boule mobile, des aiguilles ou des tiges analogues à celle qu'il avait étudiée.

3. **Loi de la perte par l'air.** — La balance est disposée de la même manière que pour les répulsions électriques.

Les deux boules parfaitement égales étant en contact au zéro, on les électrise en commun à l'aide de l'épingle à grosse tête : la boule mobile est repoussée jusqu'à une assez grande distance. En tournant l'index du micromètre supérieur, on amène l'aiguille à une distance angulaire plus petite, un peu supérieure à une valeur déterminée α. Comme les deux boules perdent de l'électricité avec le temps, la répulsion diminue peu à peu et la boule mobile se rapproche continuement de la boule fixe. Au bout d'un certain temps, elle passe par la division α; on note exactement l'heure t_0 de l'observation et on lit l'angle β_0 indiqué par le micromètre : la torsion du fil est alors $\alpha + \beta_0 = T_0$. On détord le fil de manière à ramener l'aiguille à une distance angulaire un peu supérieure à α. On note l'heure t_1 à laquelle la boule mobile passe de nouveau à la division α par suite de la déperdition de l'électricité ; on lit le nouvel angle β_1 indiqué par le micromètre; la torsion correspondante est $\alpha + \beta_1 = T_1$. On continue l'expérience de la même manière et l'on forme un tableau qui renferme les torsions observées à différentes heures pour la même distance angulaire α;

Heures :	t_0	t_1	t_2.
Torsions :	T_0	T_1	T_2.

A chaque observation correspond une équation d'équilibre de la forme

$$F l \cos \frac{\alpha}{2} = c(\alpha + \beta) = c T;$$

comme la distance angulaire est constante dans toutes les expériences d'une même série, les torsions sont proportionnelles aux forces répulsives qui s'exercent entre les boules, c'est-à-dire que

$$\frac{F_0}{T_0} = \frac{F_1}{T_1} = \frac{F_2}{T_2} = \dots$$

Pour comparer ces résultats, faisons une remarque qui a sans doute guidé Coulomb.

La différence des états électriques d'un corps et du milieu environnant et la différence des températures d'un corps et de son

enceinte offrent une grande analogie. On peut donc supposer que l'électricité se dissipe de la même manière que la chaleur, ou, en d'autres termes, que la loi de Newton, relative au refroidissement, s'étend au phénomène de la déperdition électrique. S'il en est ainsi, *la diminution de torsion ou de force répulsive pendant l'unité de temps est proportionnelle à la torsion ou force répulsive moyenne pendant ce temps*, de même que l'abaissement de température pendant l'unité de temps est proportionnel à l'excès moyen de température pendant ce temps.

Or, dans l'intervalle $t_1 - t_0$ des deux premières expériences, la diminution moyenne de torsion pendant l'unité de temps est

$$\frac{T_0 - T_1}{t_1 - t_0};$$

la torsion moyenne est

$$\frac{T_0 + T_1}{2}.$$

Dans l'intervalle $t_2 - t_1$ de la seconde et de la troisième expérience, la diminution moyenne de torsion pendant l'unité de temps est

$$\frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1};$$

la torsion moyenne est

$$\frac{T_1 + T_2}{2},$$

et ainsi de suite. En comparant la perte moyenne de torsion, par unité de temps, pendant les intervalles successifs $t_1 - t_0$, $t_2 - t_1$, ..., à la torsion moyenne correspondante, Coulomb a toujours trouvé, pour une même série d'expériences, que les différents rapports

$$\frac{\frac{T_0 - T_1}{t_1 - t_0}}{\frac{T_0 + T_1}{2}}, \qquad \frac{\frac{T^1 - T^2}{t^2 - t_1}}{\frac{T_1 + T_2}{2}}, \qquad \ldots$$

étaient sensiblement égaux. La valeur constante de ces rapports est ce qu'on nomme le *coefficient de déperdition de l'électricité;* c'est la perte de torsion pendant l'unité de temps lorsque la torsion

moyenne pendant ce temps est égale à l'unité. Voici l'une des séries d'observations de Coulomb.

ÉPOQUE des observations.	DISTANCE des boules.	TORSION du micromètre.	RAPPORT de la diminution de torsion pendant 1' à la torsion moyenne.
$6^h 32^m 30^s$	30°	120°	
			$\frac{1}{40}$
$6^h 38^m 15^s$	30°	100°	
			$\frac{1}{38}$
$6^h 44^m 30^s$	30°	80°	
			$\frac{1}{42}$
$6^h 53^m 0^s$	30°	60°	
			$\frac{1}{40}$
$7^h 3^m 0^s$	30°	40°	
			$\frac{1}{42}$
$7^h 17^m 0^s$	30°	20°	

On voit que les rapports indiqués dans la dernière colonne sont sensiblement égaux, la moyenne étant environ $\frac{1}{41}$.

4. **Loi de Coulomb**. — Cette relation expérimentale conduit à une formule empirique qui permet d'exprimer les torsions en fonction des temps écoulés.

Soient T la torsion du fil à l'instant t, lorsque les boules sont à une distance angulaire α, et $T + \Delta T$ la torsion du même fil à l'instant suivant très voisin $t + \Delta t$ et pour la même distance angulaire. La perte moyenne de torsion pendant l'unité de temps est $-\frac{\Delta T}{\Delta t}$, et la torsion moyenne est $T + \frac{\Delta T}{2}$. D'après la relation pré-

cédente, on aura

$$\frac{-\frac{\Delta T}{dt}}{T+\frac{\Delta T}{2}} = m,$$

m étant le coefficient de déperdition dans les conditions actuelles. Or, il résulte des résultats obtenus par Coulomb que la valeur de m est indépendante de l'intervalle de temps Δt, lequel variait de 5 à 10 minutes dans les expériences. On peut donc admettre que la même relation est exacte pour des intervalles de temps infiniment petits, et l'on a, en faisant tendre Δt vers zéro et passant à la limite,

$$\frac{-\frac{dT}{dt}}{T} = m;$$

d'où, par une intégration immédiate, en appelant T_0 la torsion initiale du fil,

$$T = T_0 e^{-mt}. \quad (1)$$

En appliquant cette formule à la série d'observations contenues dans le tableau précédent, on reconnaît que l'accord est très satisfaisant entre les nombres observés et calculés.

Ainsi, *les torsions nécessaires pour maintenir les deux boules à une distance angulaire constante décroissent en progression géométrique, lorsque les temps écoulés croissent en progression arithmétique.*

Comme les forces répulsives sont proportionnelles aux torsions, on peut aussi écrire

$$F = F_0 e^{-mt}.$$

Donc, *à distance constante, la répulsion de deux boules chargées primitivement de quantités égales d'électricité, décroît en progression géométrique lorsque le temps croît en progression arithmétique.*

On peut aussi conclure de ce qui précède que, dans les expériences de Coulomb, la charge électrique de chaque boule décroît elle-même en progression géométrique.

En effet, si, comme on l'a supposé plus haut, les deux boules

sont égales, la force répulsive est à chaque instant proportionnelle au carré de leur charge commune; en d'autres termes, on a

$$\frac{Q^2}{Q_0^2} = \frac{F}{F_0},$$

Q_0 et Q désignant les charges initiale et finale; par suite

$$(2) \qquad Q = Q_0 \sqrt{\frac{F}{F_0}} = Q_0 e^{\frac{-mt}{2}} = Q_0 e^{m't}.$$

Le coefficient m' de diminution de la charge électrique est égal à la moitié du coefficient de déperdition lorsque les deux boules sont égales et également chargées.

La valeur m du coefficient de déperdition peut se déduire immédiatement de l'équation (1), au moyen des valeurs T_0 et T'_1 de la torsion observées aux temps t_1 et t'_1. Ces quantités devant vérifier la formule, on a séparément

$$T_1 = T_0 e^{-mt_1} \quad \text{et} \quad T'_1 = T_0 e^{-mt'_1},$$

d'où, en divisant membre à membre,

$$\frac{T'_1}{T_1} = e^{-m(t'_1 - t_1)}.$$

Il suffit maintenant de prendre les logarithmes des deux membres; on obtient

$$m = \frac{\log T_1 - \log T'_1}{M(t'_1 - t_1)},$$

M désignant le module des tables.

5. **Résultats des expériences de Coulomb.** — Lorsque l'air est sec et que les charges électriques sont faibles, la constante m ou le coefficient de déperdition est indépendant des charges relatives et des dimensions des corps électrisés, de leur forme et même de leur nature. C'est ce que Coulomb a démontré par de nombreuses expériences. Il a fait varier la forme et les dimensions de la boule fixe, en employant soit des cercles de papier et de métal, soit un globe d'un pied de diamètre, soit encore des cylindres métalliques de toutes les longueurs et de toutes les grosseurs. Dans tous les

cas il a trouvé que, lorsque la charge est *réduite à un certain point*, le décroissement de la répulsion qui s'exerce à distance constante entre ces corps de figures différentes est, à la minute, la même fraction de la force répulsive moyenne qui existe pendant cette minute. Il a même, en un jour très sec, armé l'une des balles d'un petit fil fin de cuivre : comme il arrive pour toutes les figures anguleuses et pointues, cette balle a perdu d'abord une grande quantité d'électricité; puis elle a atteint la vitesse de déperdition commune à tous les autres corps observés dans les mêmes conditions. Coulomb a constaté aussi que la nature des corps n'a aucune influence sur la loi de décroissement : le coefficient de déperdition restait encore constant si l'on substituait à l'une des balles de sureau une balle isolante de cire d'Espagne, que l'on avait chargée d'électricité en lui faisant toucher un corps fortement électrisé.

En variant les distances des deux corps électrisés entre des limites étendues, Coulomb s'est assuré que le coefficient m est indépendant de la distance de ces corps.

Si l'on s'appuie sur ces expériences, on peut, avec Coulomb, admettre comme *probable* que la loi géométrique, énoncée plus haut pour deux charges égales, représente encore celle de la déperdition que subirait l'électricité accumulée sur une sphère isolée et qui ne serait soumise à aucune influence extérieure.

Le coefficient de déperdition dépend essentiellement de l'état hygrométrique de l'air; il augmente rapidement avec la proportion de vapeur d'eau répandue dans l'air, comme le montrent les valeurs suivantes données par Coulomb.

Degrés de l'hygromètre de Saussure.	Coefficient de déperdition.
69°	$\frac{1}{60}$
75°	$\frac{1}{41}$
80°	$\frac{1}{29}$
87°	$\frac{1}{14}$

Coulomb n'a étudié qu'un cas particulier de la perte par l'air, c'est-à-dire celui qui se rapporte aux conditions de charge, de pression, d'état hygrométrique habituellement réalisées. Mais il s'était proposé de traiter le problème de la déperdition à un point de vue plus général.

« J'avais imaginé, dit-il, pour compléter mon travail, de renfermer les corps électrisés dans différentes espèces d'air, de donner à ces airs différents degrés de densité et d'humidité, et de chercher ensuite dans chaque état des airs la loi du décroissement de l'électricité. »

Malheureusement les expériences n'ont pas été faites : il fallait pour ces expériences un ensemble d'appareils et des loisirs qui paraissent avoir manqué à Coulomb. Le programme conçu par l'illustre physicien français a été à peu près réalisé plus tard par Matteucci.

6. **Recherches de Matteucci.** — Matteucci a étudié l'influence des divers éléments dont dépend la valeur du coefficient de déperdition. *A priori*, on comprend que les principales causes perturbatrices sont : 1° la température ; 2° la nature de l'électricité ; 3° la nature des corps et des gaz ; 4° la distance des corps en présence ; 5° l'état hygrométrique ; 6° le mouvement de l'air ; 7° la pression.

1° *Influence de la température.* — Matteucci a reconnu que la perte d'électricité, dans les gaz secs et purs, augmente assez rapidement quand la température s'élève. Ainsi il a trouvé que, pour une même déperdition, il fallait 278 minutes à la température de 0°, 250 minutes à 13°,5, et 167 minutes seulement à 22° ; mais il n'a énoncé à cet égard aucune loi précise.

2° *Influence de la nature de l'électricité.* — Biot avait vérifié par des expériences comparatives que, dans le même état de l'air et avec les charges électriques qu'employait Coulomb, la déperdition est également rapide pour les deux électricités. Mais, depuis cette époque, Faraday constata que la perte est plus rapide pour l'électricité négative. Matteucci a trouvé que, dans les gaz secs et purs, *lorsque les deux boules sont électrisées de la même*

manière, la déperdition est la même pour les deux électricités, tant que les charges ne dépassent pas certaines limites; au delà de ces limites, elle est plus rapide pour l'électricité négative que pour l'électricité positive.

3° *Influence de la nature des gaz et des corps.* — Matteucci a démontré que la déperdition est la même dans tous les gaz (air, hydrogène et acide carbonique) secs et pris à la même température et à la même pression. Mais, au milieu de gaz amenés à un état absolu de siccité par l'acide phosphorique anhydre, la déperdition ne paraît plus suivre la loi trouvée par Coulomb; elle serait, d'après Matteucci, proportionnelle au temps; de sorte que si q_0 est la charge initiale, q la charge après le temps t, a une constante, on a

$$q = q_0 - at.$$

Le coefficient de diminution de charge électrique est alors

$$\frac{-a}{q_0 - at};$$

au lieu d'être constant comme l'avait trouvé Coulomb, il irait en croissant avec le temps, c'est-à-dire à mesure que la charge diminuerait.

Puisque la nature des gaz n'exerce aucune influence sur la perte électrique, il suffisait désormais d'opérer avec l'air sec; Matteucci a reconnu que la perte est indépendante de la nature des corps (verre, résine, métal), c'est-à-dire de leur conductibilité : ce dernier résultat avait déjà été énoncé par Coulomb.

4° *Influence de la distance.* — Des expériences de Matteucci il résulte que la perte d'électricité à l'intérieur d'une balance augmente rapidement quand on rapproche les deux boules. Le savant italien observait, à la même température et dans l'air sec, le temps pendant lequel s'effectuait une même perte de torsion de 10°, lorsque les boules étaient inégalement écartées. Cette perte s'effectuait en $10^m 30^s$ pour un écart de 36°, en $6^m 3^s$ pour un écart de 26°, et en $4^m 30^s$ pour un écart de 18°. Ainsi le coefficient de déperdition s'élève rapidement à mesure que diminue l'écart des deux boules. On conçoit que leur distance puisse avoir une

influence notable dans le phénomène actuel, puisque avec leurs positions relatives varient les actions réciproques que les électricités en présence exercent l'une sur l'autre.

5° *Influence de l'état hygrométrique.* — Coulomb avait reconnu que l'état hygrométrique de l'air de la balance exerce une grande influence sur la valeur du coefficient de la déperdition électrique; il avait même déduit de ses expériences que *ce coefficient est sensiblement proportionnel au cube du poids de la vapeur d'eau contenue dans l'air.* Tout en constatant l'accroissement rapide de la perte avec l'état hygrométrique, Matteucci n'a pas confirmé cette loi. De plus, et ce fait est fort important, il a reconnu que dans un air absolument sec le coefficient de la perte, toutes choses égales d'ailleurs, n'a pas une valeur égale au $\frac{1}{10}$ de celle qu'il possède dans une atmosphère dont l'état hygrométrique est un peu considérable, pourvu que la température soit bien fixe. De ce fait on peut conclure que, dans les expériences de Coulomb, la plus forte partie des pertes éprouvées à la minute se trouvait due à l'humidité atmosphérique.

6° *Influence du mouvement de l'air.* — Matteucci a observé ce résultat surprenant : si l'on détermine le coefficient de déperdition de deux boules dont l'une est en repos pendant que l'autre est vivement agitée, la perte d'électricité est moindre pour la boule agitée, au lieu d'être plus grande comme on serait porté à le présumer. C'est ce qu'on peut vérifier très simplement : on prend deux boules identiques, isolées et électrisées au contact l'une de l'autre; on tient l'une immobile pendant qu'on agite vivement l'autre; au bout d'un certain temps, on les approche séparément d'un électroscope ordinaire et l'on reconnaît que la boule qui a été agitée produit encore une déviation sensible sur l'électroscope, tandis que l'autre ne manifeste plus aucune trace d'électrisation.

7° *Influence de la pression.* — En étudiant l'influence des changements de pression, Matteucci est parvenu à des résultats très intéressants.

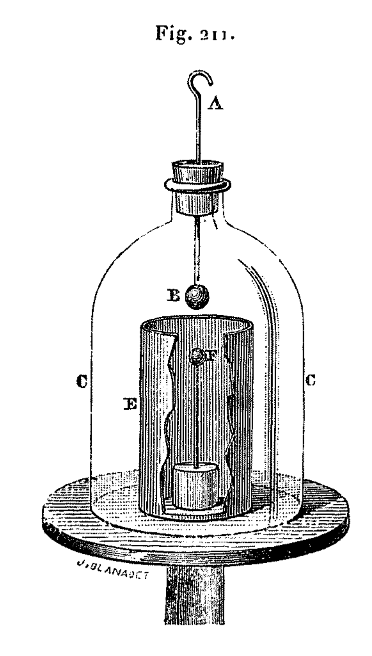
Si un corps est chargé avec une source puissante et placé ensuite dans une atmosphère raréfiée, il perd d'abord très rapide-

ment et pour ainsi dire brusquement une grande partie de son électricité et ne garde qu'une charge *limite* qui subit ensuite une déperdition lente et régulière.

Cette charge *limite*, c'est-à-dire la quantité *maximum* de fluide retenue par le corps au sein d'un gaz est d'autant plus faible que la pression ou la densité du gaz est moindre. Voici comment Matteucci le démontre :

« La boule fixe F de la balance de Coulomb, munie de sa tige

Fig. 211.



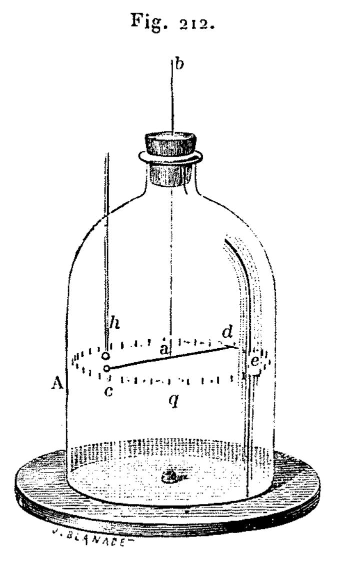
isolante, était placée dans l'axe d'une cavité cylindrique E de métal, mise en communication avec le sol et ayant $0^m,10$ de diamètre (*fig.* 211). On recouvrait le cylindre et la boule avec une grande cloche de verre, munie d'une tubulure dans laquelle on faisait glisser une tige métallique terminée à son extrémité inférieure par une boule B et à son extrémité supérieure par un crochet A. On faisait ensuite toucher les deux boules et l'on épuisait l'air en s'arrêtant, dans différentes expériences successives, à des

degrés de vide inégaux. Dans chaque cas, à l'aide d'une bouteille de Leyde, toujours chargée avec le même nombre de tours de la machine, on électrisait la boule F; on relevait la tige AB avec un manche isolant, on rendait l'air, et l'on portait rapidement la boule F dans la balance même pour mesurer la quantité d'électricité qu'elle avait retenue dans l'opération; or, en opérant ainsi sous toutes les pressions comprises entre $0^{m},005$ et $0^{m},760$, on a trouvé que les quantités de fluide restées sur la boule *varient dans les mêmes rapports que les pressions ou densités de l'air intérieur.* »

Lorsque la charge limite est une fois atteinte, la déperdition régulière et progressive qui se manifeste est d'autant plus lente que l'air environnant est plus raréfié. A l'appui de cette assertion, nous citerons l'expérience suivante de Matteucci :

Sous une cloche A (*fig.* 212), il suspend à un fil de cocon *ab*

Fig. 212.



une mince aiguille de gomme laque, qui supporte à l'une de ses extrémités une très petite aiguille aimantée *de* et à l'autre une balle de sureau *c*. Dans la même cloche est fixée une tige de gomme laque

qui porte aussi une balle de sureau *h*. Enfin une division *q* est collée sur le pourtour de la cloche. L'appareil est disposé sur la platine d'une machine pneumatique, de telle sorte que les deux boules *h* et *c* se trouvent en contact dans la position d'équilibre naturel de l'aiguille. On peut électriser les deux boules *h* et *c* à l'aide d'un conducteur courbe qu'on passe à travers la tubulure de la cloche, et que l'on éloigne ensuite. Dans une de ses expériences, Matteucci a trouvé que lorsque la pression intérieure restait égale à $0^m,757$, l'aiguille, d'abord chassée à 40°, mettait $4^h 5^m$ pour revenir de cette déviation jusqu'au contact. Il répéta la même expérience en établissant sous la cloche une pression de $0^m,400$: l'aiguille, d'abord chassée à 38°, se trouvait encore à 13° du zéro au bout de $14^h 15^m$.

Ces résultats expliquent comment l'électricité à haute tension peut se disséminer dans l'air raréfié en y développant des phénomènes curieux, tels que des étincelles électriques d'une longueur considérable : le corps électrisé, dont la charge est entretenue par une source puissante, ne peut en effet retenir qu'une charge limite d'autant plus petite que la pression de l'air est plus faible. Toutefois le mécanisme de la diffusion électrique n'est pas aussi simple. Walsh a constaté le premier, et un grand nombre d'observateurs ont vérifié depuis, que la résistance au passage de l'électricité à travers un gaz augmente à mesure que la raréfaction augmente et que, dans le vide absolu, cette résistance est telle que les flux électriques ne peuvent plus s'échanger.

7. **Pertes par les supports.** — Coulomb a aussi étudié la déperdition par les supports ; mais il n'a pas cherché la loi de la perte par les isolateurs imparfaits. Il a montré seulement qu'un support de longueur donnée, incapable d'isoler parfaitement une forte charge, peut en isoler une plus faible, et il a établi une relation entre les longueurs des supports et la charge électrique maximum qu'ils sont capables d'isoler.

Voici la méthode employée par Coulomb : On suppose qu'à l'origine la boule mobile et la boule fixe sont soutenues chacune par une aiguille de gomme laque, qui est un isolant parfait. On remplace le support de la boule fixe par le corps que l'on veut

étudier; on communique aux deux boules une électricité commune et l'on compare, comme on l'a fait précédemment, les torsions successives correspondant à un même angle d'écart. On trouve ainsi que le rapport entre la perte de torsion pendant une minute et la torsion moyenne est beaucoup plus grand dans ce cas que dans celui où la boule fixe est soutenue par un isolateur parfait au milieu d'une atmosphère identique : cela prouve qu'une partie de l'électricité s'échappe par le support soumis à l'essai. Mais ce rapport diminue peu à peu, et bientôt on atteint une limite à partir de laquelle la perte dans le même temps est la même que si l'isolement est complet; il est évident qu'alors le support essayé ne laisse plus échapper d'électricité et maintient la charge réduite de la boule. Pour mieux dire, les choses se passent comme si la perte était entièrement due au contact de l'air.

Avec les longueurs des supports croissent les charges électriques qu'ils sont capables d'isoler. En admettant la loi de Coulomb, on démontre aisément que les charges, qui peuvent être isolées par un support de nature et d'épaisseur déterminées, varient proportionnellement à la racine carrée de la longueur attribuée à ce support.

A l'origine, et puisque les deux balles sont égales, on a en effet

$$(1) \qquad T_0 = KQ_0^2,$$

T_0 étant la torsion trouvée, et Q_0 la charge commune acquise au contact.

Soit Q' la charge de la boule fixe, au bout du temps t observé lorsque l'expérience accuse un isolement parfait; soient aussi Q la charge de la boule mobile et T la torsion mesurée à cet instant t; la torsion est toujours proportionnelle aux charges et l'on a de même

$$(2) \qquad T = K.QQ'.$$

Mais comme la boule mobile est parfaitement isolée sur son support de gomme laque, la charge Q qu'elle a retenue se calcule par la loi de Coulomb, à l'aide de la formule

$$(3) \qquad Q = Q_0 e^{-\frac{mt}{2}}.$$

En éliminant Q et Q_0 entre ces trois équations, on trouve

$$Q' = \frac{1}{\sqrt{K}} \frac{T}{\sqrt{T_0}} e^{\frac{mt}{2}}.$$

Si l'on répète la même expérience en soutenant la boule fixe par un support de même nature et de même épaisseur, mais de longueur quadruple, et si l'on détermine la torsion T' et le temps t' pour lesquels commence l'isolement absolu, on a la relation analogue

$$Q'' = \frac{1}{\sqrt{K}} \frac{T'}{\sqrt{T_0}} e^{\frac{mt'}{2}},$$

K étant le même dans cette équation et la précédente, puisque par hypothèse les boules et leurs distances réciproques sont restées ce qu'elles étaient d'abord.

Coulomb a ainsi opéré sur deux fils de soie, d'un seul brin, tels qu'on les tire du cocon, le premier de 15 pouces et le second de 60 pouces de longueur : il a trouvé que le rapport des charges limites Q' et Q'' était égal à celui des racines carrées des nombres 15 et 60.

Coulomb a pu aussi comparer la *puissance isolante* des différentes substances : il a trouvé que la charge électrique, pour laquelle l'isolement absolu commence, est 10 fois plus forte avec la gomme laque qu'avec la soie.

On a essayé de comparer les résistances que les fluides électriques éprouvent dans leur mouvement à travers les isolants : les expériences tentées à ce sujet paraissent établir que cette résistance est moindre pour le fluide négatif que pour le fluide positif, toutes choses égales d'ailleurs.

NOTE VI.

SUR LE POTENTIEL.

1. Quand on veut soulever un corps, il faut vaincre attraction terrestre et dépenser un travail contre la pesanteur. Au contraire, si le corps est abandonné à lui-même, la pesanteur l'entraîne : il y a production de force vive, c'est-à-dire travail accompli par la pesanteur sur le corps.

Concevons un système électrisé. Une masse électrique, placée en un point quelconque de l'espace environnant, est attirée ou repoussée ; si cette masse se meut, il y a travail dépensé contre les forces électriques qui émanent du système ou travail accompli par ces forces, suivant le sens dans lequel la masse se déplace.

Il en est encore de même pour une masse magnétique placée dans l'espace qui entoure un système d'aimants.

2. **Champ de force.** — D'une manière générale, on appelle *champ de force* toute région de l'espace, d'étendue limitée ou indéfinie, dans laquelle, deux points quelconques A et B étant donnés, il y a travail dépensé sur une masse de nature déterminée pour la déplacer de B en A et travail accompli sur cette masse revenant de A en B.

Il y a donc lieu de considérer le *champ de force terrestre*, le *champ de force électrique*, *le champ de force magnétique*, etc. L'espace universel, où s'exercent les différentes forces naturelles,

est ainsi constitué par des champs doués de propriétés diverses, qui se pénètrent, se confondent et se superposent. Nous ne nous occupons ici que du *champ électrique*.

3. **Ligne de force.** — On appelle *ligne de force* une ligne tangente en chaque point à la direction de la force résultante électrique.

En chaque point du champ passe une ligne de force. Cette ligne est unique; si deux lignes de force pouvaient se couper, il y aurait, à leur intersection, deux directions de la force résultante, ce qui est une impossibilité évidente.

4. **Intensité du champ.** — L'intensité de la force résultante, qui entraîne une masse électrique donnée le long d'une ligne de force, est proportionnelle à la grandeur de cette masse. Si l'on veut exprimer les valeurs variables de la résultante aux différents points du champ, il faut choisir une masse électrique définie, c'est-à-dire une *charge d'épreuve*, et déterminer l'intensité de la force qui s'exerce sur elle aux diverses positions qu'elle occupe. On prend pour charge d'épreuve *l'unité de quantité d'électricité positive*, à laquelle on donne aussi le nom de *charge unité*. D'après cela, on appelle *intensité du champ* en un point la force qui s'exerce sur la charge unité placée en ce point.

On admet que la charge unité ne trouble pas la distribution de l'électricité sur les différentes parties du système électrisé qui forment le champ.

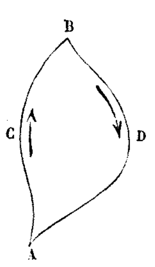
5. **Direction du champ**. — Deux particules électrisées, l'une positivement, l'autre négativement, se meuvent en sens contraire, le long d'une ligne de force, sous l'action du champ. On convient d'adopter, pour la *direction positive* de la ligne de force et, par conséquent, du champ, la direction que suit la charge unité, abandonnée à elle-même et libre d'obéir aux forces qui la sollicitent.

6. **Définition du potentiel.** — La connaissance d'un champ électrique est complète, lorsqu'on a déterminé en chaque point sa direction et son intensité. Nous allons montrer comment ces deux

éléments peuvent être exprimés d'une manière plus concise en fonction d'une quantité unique, le *Potentiel*.

Soient (*fig.* 213) A et B deux points du champ électrique. Si le déplacement de la charge unité a lieu de B en A contre les forces du champ, il y a dépense d'une certaine quantité de travail; au contraire, si la charge unité, abandonnée à elle-même, revient de A en B sous l'action des forces du champ, le travail est accompli par ces forces; l'énergie acquise est égale au travail dépensé. Le principe de la conservation de l'énergie nous apprend que les quantités de travail ou d'énergie produites sont indépendantes du

Fig. 213.



chemin suivi par la charge quand elle passe de A en B ou de B en A. En effet, admettons que l'énergie acquise dans le mouvement suivant ACB soit plus grande que l'énergie gagnée dans le mouvement suivant tout autre chemin ADB ; en faisant circuler constamment la charge unité dans le sens ACBDA, indiqué par les flèches, on réaliserait un gain d'énergie à chaque révolution, et, par suite, on obtiendrait une source illimitée d'énergie, sans dépense équivalente.

On appelle *différence de potentiel* de deux points quelconques A et B le travail accompli par les forces électriques sur la charge unité qui irait de A en B, ou, inversement, le travail dépensé contre les forces électriques sur la charge unité qui irait de B en A.

Le travail ainsi défini, c'est-à-dire la différence de potentiel des points A et B, ne dépend que de la position de ces deux points

dans le champ, ou, comme on dit, de leurs coordonnées. Il est donc égal à la différence des valeurs V_a et V_b, que prend une même fonction V des coordonnées x, y, z en ces deux points, et l'on peut écrire, en représentant par T_a^b la différence de potentiel des points A et B,

$$T_a^b = V_a - V_b. \tag{1}$$

L'*unité de différence de potentiel* est la différence de potentiel qui existe entre deux points quand la charge unité passant de l'un à l'autre produit l'unité de travail.

La fonction V a reçu le nom de *potentiel,* et la valeur particulière qu'elle prend au point A s'appelle *potentiel du champ en ce point.*

Les variations du potentiel V mesurent le travail électrique; mais la valeur absolue du potentiel n'est pas connue et même elle échappe à toute détermination.

On peut dire que le potentiel électrique est analogue à la température : le zéro absolu de potentiel n'existe pas plus que le zéro absolu de température. Lorsqu'on parle de la température d'un point de l'espace, au voisinage d'un corps chaud, on veut désigner seulement la différence qui existe entre son état thermique et celui de la glace fondante, la température de la glace fondante servant de terme de comparaison à cause de la facilité que l'on trouve à la reproduire. De même encore, quand on veut définir le niveau où se trouve porté une masse pesante, on dit qu'elle est à une distance verticale déterminée, au-dessus ou au-dessous d'un plan de comparaison choisi arbitrairement, par exemple le plan horizontal mené suivant la ligne des hautes marées à la Trinité. Par analogie, dans la pratique, nous choisirons comme *zéro* ou *origine* des potentiels le potentiel de la terre ou d'un corps quelconque communiquant avec la terre.

Si le point B est sur le sol ou rattaché au sol par un conducteur, on aura par conséquent $V_b = 0$, et l'on déduira de l'équation (1)

$$T_a^0 = V_a, \tag{2}$$

d'où cette définition du potentiel :

Le potentiel électrique en un point A *a pour valeur numérique le travail qui correspond au transport de la charge unité depuis ce point jusqu'au sol par un chemin quelconque.*

Le signe du potentiel est le même que celui du travail des forces électriques dans le déplacement de la charge unité du point A jusqu'au sol. Or ce travail est considéré comme *positif* quand il est *accompli* par les forces électriques du champ; au contraire il est considéré comme *négatif* quand il est *dépensé* contre ces forces mêmes. Le potentiel *au point* A est donc *positif* quand il y a dépense de travail contre les forces électriques pour amener la charge unité du potentiel zéro en ce point; au contraire le potentiel *au point* A est *négatif* quand il y a travail accompli par les forces du champ sur la charge unité qui irait du potentiel zéro en ce point.

La *différence de potentiel* de deux points A et B est *positive* ou *négative* suivant qu'il y a travail *accompli* ou *dépensé* sur la charge unité pendant le déplacement de A à B; dans le premier cas, on dit que le point A est à un potentiel plus élevé que B; et, dans le second cas, que le potentiel de A est inférieur à celui de B.

Supposons qu'une masse électrique soit abandonnée à elle-même dans un champ électrique ; si elle est positive, elle tend à marcher sur une ligne de force vers les points de moindre potentiel; si elle est négative, elle s'avancera vers les hauts potentiels.

La direction que nous avons définie sous le nom de *direction positive de la ligne de force ou du champ* est celle que l'on suit en passant des potentiels supérieurs vers les potentiels inférieurs.

7. **Surfaces équipotentielles.** — Imaginons qu'on ait tracé, dans le champ électrique, une surface qui coupe à angle droit toutes les lignes de force qu'elle rencontre. Si la charge unité se meut sur une telle surface, le travail élémentaire est constamment nul, puisque la force est toujours normale au déplacement. La variation du potentiel est donc nulle sur toute l'étendue de la surface, ou en d'autres termes le potentiel a la même valeur en tous les points de celle-ci. On l'appelle pour cette raison surface *équipotentielle*.

Il est évident que deux surfaces équipotentielles, de potentiels différents, ne peuvent se couper; car, à leur intersection, le potentiel aurait deux valeurs différentes. Mais une surface équipotentielle peut se couper elle-même (c'est ce qui a lieu en tous les points d'équilibre et sur toutes les lignes d'équilibre).

La théorie du potentiel s'applique à toutes les forces centrales, telles que la gravitation universelle, les forces magnétiques, etc. S'il s'agissait de la pesanteur, les lignes de force seraient des verticales et les surfaces équipotentielles des plans horizontaux disposés à des hauteurs ou *niveaux* différents.

De même que, pour transporter une masse pesante d'un point à un autre au même potentiel de gravitation, c'est-à-dire au *même niveau,* aucun travail n'est produit sous l'influence de l'attraction terrestre; de même pour transporter la charge unité d'un point à un autre au même potentiel électrique, il n'est besoin d'aucun travail dû aux forces électriques mises en jeu. C'est pour cette raison que l'on appelle souvent par analogie les surfaces équipotentielles électriques des *surfaces de niveau.*

8. **Expression de la force en fonction du potentiel.** — Considérons (*fig.* 214) deux surfaces équipotentielles S et S′, infiniment

Fig. 214.

voisines, dont les potentiels sont V et $V + dV$, et qui sont coupées par la ligne de force LL en deux points A et B, distants d'une lon-

gueur infiniment petite dn. Si R est l'intensité du champ au point A, on a, d'après la définition même de la différence de potentiel,

$$R\,dn = -dV,$$

d'où

$$R = -\frac{dV}{dn}.$$

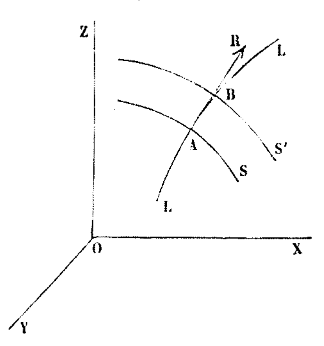
Ainsi, l'*intensité du champ en un point est égale et de signe contraire à la dérivée partielle du potentiel par rapport à la tangente à la ligne de force qui passe en ce point.*

Cette force est toujours dirigée du côté vers lequel le potentiel diminue, c'est-à-dire vers l'extérieur de chaque surface équipotentielle.

Les composantes de l'intensité du champ par rapport à une direction quelconque jouissent de la même propriété.

En effet, menons par le point A, dans une direction quelconque,

Fig. 215.



une droite AM de longueur dl, limitée aux deux surfaces consécutives S et S', et soit F la composante de la force R dirigée suivant AM. La variation du potentiel de A en B est égale à celle qui se produit de A en M; et, par suite, le travail correspondant à ces deux déplacements étant le même, on a l'égalité

$$F\,dl = R\,dn$$

d'où

$$F = R.\frac{dn}{dl} = -\frac{dV}{dn}\frac{dn}{dl} = -\frac{dV}{dl}.$$

Ainsi, *la composante de l'intensité du champ suivant une direction quelconque est égale et de signe contraire à la dérivée partielle du potentiel suivant cette direction.*

Considérons maintenant (*fig.* 215) trois axes rectangulaires OX, OY, OZ, et soient X, Y, Z les composantes de la force R parallèles aux axes et dx, dy, dz les déplacements virtuels parallèles aux axes et limités aux deux surfaces S et S'. Le travail accompli par la charge unité sera évidemment le même dans ces trois directions, ce qui donne

$$X = -\frac{dV}{dx}$$

$$Y = -\frac{dV}{dy}$$

$$Z = -\frac{dV}{dz}$$

et

$$R^2 = \left(\frac{dV}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dV}{dy}\right)^2 + \left(\frac{dV}{dz}\right)^2.$$

Ainsi *les composantes* X, Y, Z *sont égales et de signes contraires aux dérivées partielles du potentiel suivant les trois axes.*

9. **Représentation graphique d'un champ électrique.** — A l'aide des surfaces équipotentielles et des lignes de force, on peut explorer un champ électrique et obtenir en chaque point une représentation graphique de son intensité et de sa direction.

Considérons (*fig.* 216) un système électrisé qui développe nécessairement autour de lui un certain champ, et construisons dans ce champ une série de surfaces équipotentielles telles que la différence de potentiel de deux surfaces consécutives soit très petite et égale à une quantité constante α, et que les potentiels de ces surfaces aient ainsi pour valeurs

$$V, \quad V-\alpha, \quad V-2\alpha, \quad \ldots.$$

Traçons enfin les trajectoires orthogonales de ces surfaces, c'est-à-dire les lignes de force.

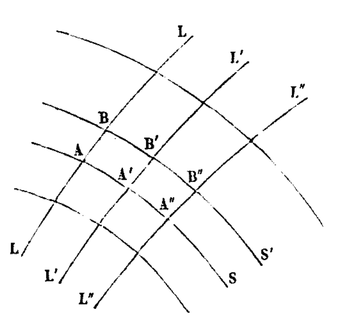
La *direction* de la force au point A, par exemple, est donnée par la tangente AB à la ligne de force en ce point. D'autre part,

quand on passe du point A de la surface S à la surface voisine S′, le potentiel subit une variation fixe α; mais les segments dn, tels que AB, A′B′, A″B″, ..., interceptés sur les lignes de force entre les deux surfaces, varient avec la position du point A. Or on sait que l'on a très approximativement

$$R = \frac{\alpha}{dn}.$$

L'*intensité du champ* en un point donné sur la surface S est donc en raison inverse du segment correspondant. Là, par exemple,

Fig. 216.



où la distance des deux surfaces devient quatre fois plus petite, la force électrique devient quatre fois plus grande.

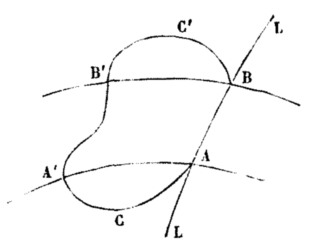
Si l'on assigne à la différence constante α une valeur égale à l'unité, la charge d'épreuve passant de l'une des surfaces à la surface voisine accomplit ou dépense toujours l'unité de travail.

Quand la charge d'épreuve se déplace d'un point à un autre à travers les surfaces équipotentielles, il peut arriver que dans une partie du trajet un certain travail soit dépensé par elle pour surmonter la résistance du champ, et qu'en une autre partie il y ait travail accompli sur la charge par les forces électriques ellesmêmes. En général le travail total, qui correspond au transport de la charge unité d'une surface S à une surface quelconque S_n, est égal à la somme algébrique des travaux accomplis ou dépensés, les premiers étant positifs, et les seconds négatifs. Il est indépendant du

chemin parcouru et même de la position du point de départ et du point d'arrivée sur les deux surfaces S et S_n. A cet égard, l'analogie est complète entre l'électricité et la pesanteur.

Soit que la charge d'épreuve suive (*fig.* 217) sur la ligne de

Fig. 217.



force le chemin direct AB, soit qu'elle fasse le détour ACA'B'C'B, la somme totale du travail demeure invariable, parce qu'elle ne dépend que de la différence de potentiel du premier et du dernier point.

10. **Expression du potentiel électrique.** — Supposons d'abord (*fig.* 218) que le système électrique se réduise à une masse $+m$, placée en un point O; soit $PQ = ds$ un petit élément de chemin parcouru par la charge unité; joignons OP et OQ, et abaissons PR perpendiculaire sur OQ. Nous poserons $OP = r$ et $OQ = r + dr$.

La force exercée par la masse m sur la charge unité placée en un point quelconque de l'élément ds est, en appliquant les lois de Coulomb,

$$\frac{m}{r^2}.$$

La composante de cette force suivant PQ est

$$\frac{m}{r^2}\cos \mathrm{RQP} = \frac{m}{r^2}\frac{dr}{ds},$$

et, par suite, le travail élémentaire relatif au déplacement élémentaire de P en Q est

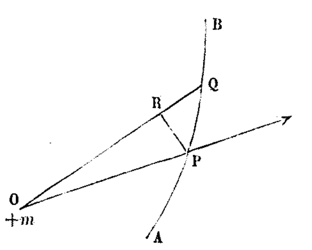
$$\frac{m}{r^2}\frac{dr}{ds}\cdot ds = \frac{m}{r^2}\cdot dr = \quad m\,d\frac{1}{r}.$$

Pour transporter la charge unité de A en B, le travail serait, en appelant r_a et r_b les distances OA et OB,

$$T_A^B = -m\int_{r_a}^{r_b} d\,\frac{1}{r} = m\left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b}\right).$$

Concevons que le point B s'éloigne à une distance infinie, c'est-

Fig. 218.



à-dire au zéro absolu de potentiel; alors $\frac{1}{r_b}$ devient nul, et le *potentiel absolu* V_a *au point* A du champ a pour expression $\frac{m}{r_a}$. Il est égal au quotient de la masse agissante par sa distance au point considéré.

Supposons maintenant que le système se compose de plusieurs masses agissantes $m, m', m'', \ldots$, fixées aux points O, O′, O″, ...; soient $r_a, r'_a, r''_a, \ldots$, les distances respectives de ces points à la charge unité placée en A; $r_b, r'_b, r''_b, \ldots$, les distances analogues pour le point B. La différence de potentiel entre les deux points A et B, c'est-à-dire le travail *total* relatif au déplacement de la charge unité de A en B, est égale à la somme algébrique des travaux partiels correspondant à chacune des masses. On a donc

$$T_A^B = m\left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b}\right) + m\left(\frac{1}{r'_a} - \frac{1}{r'_b}\right) + \cdots = \Sigma\,\frac{m}{r_a} - \Sigma\,\frac{m}{r_b};$$

$\Sigma\,\frac{m}{r_a}$ désigne la somme des potentiels absolus des différentes masses pour le point de départ A, et $\Sigma\,\frac{m}{r_b}$ la somme analogue pour le point d'arrivée B.

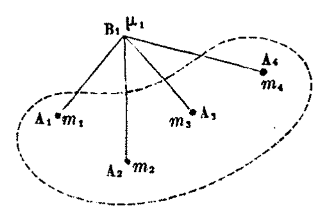
Si le point B s'éloigne à l'infini ou à une assez grande distance de toutes les parties du système pour que chaque terme $\frac{1}{r_b}$ puisse être négligé devant le terme correspondant $\frac{1}{r_a}$, on obtiendra pour la valeur du *potentiel absolu* V_a *du système au point* A

$$V_a = \Sigma \frac{m}{r_a}.$$

D'une manière générale, *le potentiel d'un système électrisé en un point* A *du champ est égal à la somme des quotients que l'on obtient en divisant chacune des masses agissantes par sa distance au point considéré.*

11. **Potentiel mutuel de deux systèmes électriques.** — Soit une masse électrique m_1, située en A_1 à une distance r_1 d'un cer-

Fig. 219.



tain point B_1; *le potentiel de la masse* m_1 *au point* B_1 est, d'après ce qui précède, égal à

$$\frac{m_1}{r_1};$$

c'est la mesure du travail accompli sur la charge unité pour la transporter du point B_1 à une distance infinie de A_1, c'est-à-dire en dehors du champ de la masse m_1. Si l'on suppose qu'au point B_1 se trouve, non plus la charge unité, mais une masse électrique μ_1, le *travail accompli pour transporter cette masse en dehors du champ de* m_1 sera égal à

$$\frac{m_1 \mu_1}{r_1}.$$

Cette expression est appelé *le potentiel de* m_1 *sur* μ_1; d'ailleurs la symétrie de sa forme montre qu'elle représente aussi le potentiel de μ_1 sur m_1.

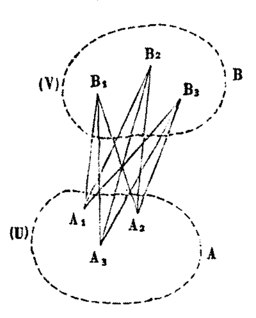
Concevons (*fig.* 219) un système de points A_1, A_2, A_3, ..., portant les masses électriques, m_1, m_2, m_3, ..., et séparés de la masse μ_1 par les distances respectives $r_1, r_2, r_3, \ldots$; la somme

$$\mu_1 \frac{m_1}{r_1} + \mu_1 \frac{m_2}{r_2} + \ldots = \mu_1 \Sigma \frac{m}{r} = \mu_1 V_1$$

représentera le *potentiel du système des particules* A ... sur μ_1, V_1 étant *le potentiel du même système au point* B_1.

Supposons enfin (*fig.* 220) qu'il y ait, en présence du système A, un second système de particules électrisées μ_1, μ_2, μ_3, ..., aux

Fig. 220.



points B_1, B_2, B_3, ..., et formons la valeur analogue à $\mu_1 \Sigma \frac{m}{r}$, pour chaque élément du système. On aura

$$\mu_1 V_1 + \mu_2 V_2 + \mu_3 V_3 + \ldots + \mu_n V_n = \Sigma \mu V,$$

$V_1, V_2, V_3, \ldots, V_n$ étant les potentiels respectifs du système A aux points B_1, B_2, B_3, ..., B_n du système B. Cette somme $\Sigma \mu V$ donnera le *potentiel total du système* A *sur le système* B, c'est-à-dire, *le travail total effectué pendant le transport du système* B *supposé rigide, depuis la position qu'il occupe jusqu'en dehors du champ de force du système* A.

Or le procédé par lequel cette valeur est obtenue revient évi-

demment à joindre chaque masse du système A à chacune des masses du système B, à mesurer les distances respectives r, puis à additionner tous les termes tels que $\frac{m\mu}{r}$. Cette somme peut s'écrire $\Sigma\Sigma\frac{m\mu}{r}$, le double symbole indiquant que les deux systèmes sont compris dans la sommation. La forme symétrique de cette dernière expression montre qu'elle doit être identique à celle qu'on aurait obtenue en calculant le potentiel $\Sigma m U$ du système B sur le système A. On en conclut que le potentiel de A sur B est le même que celui de B sur A, c'est-à-dire que l'on a

$$\Sigma \mu V = \Sigma m U. \tag{1}$$

Cette valeur commune s'appelle le *potentiel mutuel de* A *sur* B.

La relation (1) s'énonce ainsi : *La somme des produits qu'on obtient en multipliant chaque masse électrique du système* B *par la valeur du potentiel du système* A *au point que cette masse occupe, est égale à une somme analogue relative aux masses du système* A *et aux potentiels de* B *aux divers points de ce système.*

Le potentiel mutuel de deux systèmes A *et* B *a pour valeur numérique le nombre d'unités de travail qui correspond au transport de l'un quelconque des deux systèmes en dehors du champ électrique de l'autre.*

12. **Condition d'équilibre électrique sur un système de conducteurs.** — Un corps bon conducteur est un corps sur lequel l'électricité peut se mouvoir librement. Considérons un système de conducteurs électrisés, isolés les uns des autres, et soumis à leur influence réciproque. Pour qu'il y ait équilibre, il faut et il suffit que la force exercée en un point quelconque, à l'intérieur de chacun d'eux, soit égale à zéro. En effet, si cette force n'était pas nulle, elle décomposerait le fluide neutre au point considéré, et les deux quantités $+m$ et $-m$ d'électricités contraires résultant de cette décomposition seraient mises en mouvement dans des directions opposées; il n'y aurait pas équilibre. Mais puisque la force électrique est nulle dans l'intérieur de chacun des conducteurs, il ne

peut s'y produire aucune variation de potentiel; en d'autres termes, le potentiel est constant.

Ainsi, *le potentiel du système des conducteurs* A_1, A_2 *doit avoir une valeur constante* V_1 *dans toute l'étendue du conducteur* A_1, *une valeur constante* V_2 *dans toute l'étendue du conducteur* A_2, etc. Telle est la condition nécessaire et suffisante pour l'équilibre électrique.

La surface extérieure de chacun de ces conducteurs en équilibre est une surface équipotentielle, et par conséquent la force électrique lui est normale : *les lignes de force émanent normalement des conducteurs et y aboutissent normalement.*

NOTE VII.

SUR LES TUBES DE FORCE ET LEURS PROPRIÉTÉS.

1. Traçons dans un champ de force électrique une courbe fermée quelconque et, en chaque point de son contour, menons la ligne de force correspondante. Nous obtenons ainsi un canal orthogonal, limité par des lignes de force, qui coupe à angle droit toutes les surfaces équipotentielles successives. Ce canal s'appelle *tube de force*.

2. Soit (*fig.* 221) une particule O de masse $+m$. Dans le champ de cette masse les surfaces équipotentielles sont des sphères; les tubes de forces sont des cônes ayant O pour sommet commun. Considérons un de ces cônes, infiniment délié et d'ouverture angulaire $d\omega$; et soient $d\omega$, ds, ds' les éléments normaux découpés par ce cône dans les sphères de rayons 1, r, r'. Les forces f et f', exercées aux points P et P', où l'on suppose placée la charge unité, sont liées par la relation

$$fr^2 = f'r'^2 = m.$$

D'ailleurs on a évidemment

$$\frac{ds}{r^2} = \frac{ds'}{r'^2} = \frac{d\omega}{1};$$

ces relations donnent

$$fds = f'ds' = m\,d\omega.$$

Le tube de force élémentaire, limité au contour de l'élément ds, découpe sur une surface quelconque S_1 passant par le point P un élément ds_1. En appelant f_1 la composante de la force f suivant la normale en P à la surface S_1, on a

$$f_1 = f\cos\theta$$

et

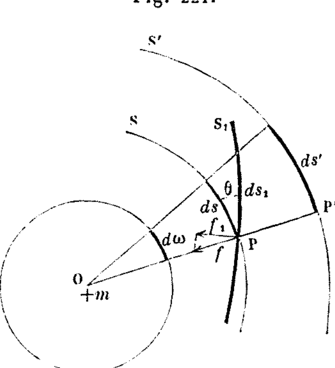
$$ds = ds_1 \cos\theta;$$

par suite

$$f_1\,ds_1 = fds = m\,d\omega.$$

Nous appellerons *flux de force à travers un élément de sur-*

Fig. 221.



face le produit de la surface ds_1 de cet élément par la composante normale f_1 de la force qui lui est appliquée.

On doit donc énoncer ainsi la relation précédente :

Le flux de force est constant dans toute l'étendue du tube de force conique.

3. Considérons une surface fermée S, entièrement convexe, et un système de masses électriques formant un champ. Il y a quatre cas à distinguer :

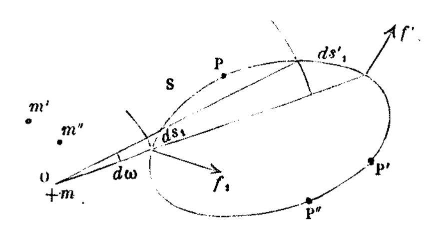
1° *Le système des masses agissantes est à l'extérieur de la surface* S.

Soit (*fig.* 222) m une de ces masses située en O. Un cône, d'ouverture angulaire infiniment petite $d\omega$, ayant son sommet en O, découpe sur cette surface deux éléments ds_1 et ds'_1. Si f_1 et f'_1 sont les composantes normales à la surface de ces éléments, on a, d'après ce qui précède,

$$f_1\, ds_1 = f'_1\, ds'_1 = m\, d\omega.$$

On voit sur la figure que le flux de force $f'_1 ds'_1$ *sort* de la surface

Fig. 222.



tandis que le flux de force $f_1 ds_1$ *entre* dans la surface; si l'on convient de regarder le premier flux comme *positif* et le second comme *négatif*, on écrira

$$f_1\, ds_1 + f'_1\, ds'_1 = 0.$$

La surface S peut être découpée en couples analogues d'éléments par des cônes issus de O; et, par suite, on a pour l'étendue entière de cette surface,

$$\Sigma f_1\, ds_1 = 0.$$

Ce qui est vrai pour chaque particule du système est aussi vrai pour l'ensemble. Si donc on désigne par F_e, F'_e, F''_e, ... la somme algébrique, sur les différents éléments P, P', P'', ... de la surface S, des composantes normales relatives à toutes les masses extérieures m, m', m'', ..., on a l'équation :

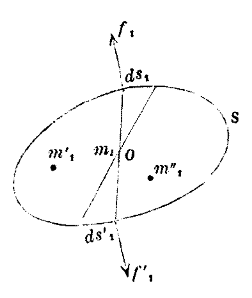
$$(1) \qquad \Sigma F_e\, ds_1 = 0.$$

Ainsi, quand le système agissant est à l'extérieur de la surface, *le flux total de force est nul* ou, en d'autres termes, *le flux de force qui sort de la surface est égal à celui qui y entre.*

2° *Le système des masses agissantes est à l'intérieur de la surface.*

Soit (*fig.* 223) m_1 une des masses du système intérieur; les éléments ds_1 et ds'_1, découpés dans la surface par le tube de force

Fig. 223.



infiniment délié émanant de la masse m_1, satisfont toujours à la relation

$$f_1\,ds_1 = f'_1\,ds'_1 = m\,d\omega.$$

Mais ici les flux de force $f_1\,ds_1$ et $f'_1\,ds'_1$ *sortent* de la surface; ils sont donc tous deux positifs et s'ajoutent; le flux total de force émis à travers la surface entière est

$$\Sigma f_1\,ds_1 = m_1\,\Sigma_0^{4\pi} d\omega = 4\pi m_1.$$

Maintenant, si l'on désigne par F_i, F'_i, F''_i, ..., la somme algébrique des composantes normales en chaque point, relatives à toutes les masses intérieures, m_1, m'_1, m''_1, ..., on a

$$\Sigma F_i\,ds_1 = 4\pi\Sigma m_1 = 4\pi M, \tag{2}$$

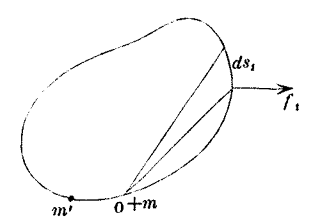
M étant la somme algébrique de ces masses. Ainsi *le flux total de force, émis par un système de masses intérieures, à travers une surface fermée, est égal à la somme algébrique des masses multipliée par* 4π.

3° *Les masses agissantes sont situées sur la surface.*

Dans ce cas, les tubes de force, émanant de chaque masse, ne coupent la surface qu'une seule fois; les forces élémentaires sont toutes dirigées vers l'extérieur et tous les flux de force *sortent* de la surface. On a, pour la masse m placée en O (*fig.* 224),

$$\Sigma f_1 ds_1 = m \Sigma_0^{2\pi} d\omega = 2\pi m,$$

Fig. 224.



et, pour le système tout entier,

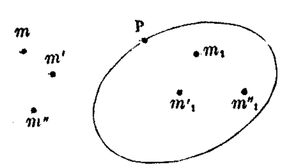
$$\Sigma F_1 ds_1 = 2\pi \Sigma m = 2\pi M. \tag{3}$$

Ainsi, *le flux total de force qui sort de la surface est égal à la somme algébrique des masses superficielles multipliée par* 2π.

4° *Le système des masses agissantes est compris en partie à l'extérieur et en partie à l'intérieur de la surface.*

Sur chaque élément P (*fig.* 225) de la surface S, la composante

Fig. 225.



normale F_1, due au système entier, est égale à la somme algébrique de deux composantes normales F_e et F_i provenant des masses extérieures et intérieures. On a pour l'élément ds_1

$$F_1 ds_1 = F_e ds_1 + F_i ds_1,$$

et pour la surface entière

$$\Sigma F_1 ds_1 = \Sigma F_e ds_1 + \Sigma F_i ds_1.$$

Mais, d'après l'équation (1), $\Sigma F_e ds_1 = 0$, et, d'après l'équation (2), $\Sigma F_i ds_1 = 4\pi M$, M désignant la somme algébrique des masses intérieures. On a donc

$$(4) \qquad \Sigma F_1 ds_1 = 4\pi m.$$

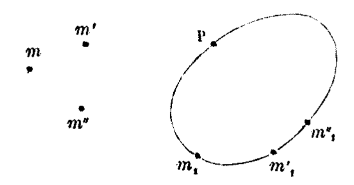
Ainsi, *dans le champ électrique d'un système, le flux de force qui traverse une surface fermée, c'est-à-dire la différence entre le flux de force qui sort et le flux de force qui entre, est égal à la somme algébrique des masses intérieures multipliée par* 4π.

Si les masses m_1, m'_1, m''_1, étaient toutes situées sur la surface S (*fig.* 226) on aurait, d'après l'équation (3),

$$(5) \qquad \Sigma F_1 ds_1 = 2\pi M.$$

Dans ce cas, *le flux total de force qui sort de la surface est*

Fig. 226.



égal à la somme algébrique des masses superficielles multipliée par 2π.

4. Au lieu de considérer dans un champ électrique une surface quelconque, prenons au sein de ce champ un tube de force dont les bases soient formées par deux surfaces quelconques S et S'.

1° Supposons d'abord (*fig.* 227) que le tube ne renferme aucune masse agissante, et appliquons l'équation (1) à cette surface tubulaire fermée, c'est-à-dire écrivons que le flux total de force du tube est nul. Puisque le tube est limité par des lignes de force, la

composante normale est nulle en chaque point de la surface latérale; nous n'avons à considérer que les forces appliquées sur les bases; dans ce cas l'équation (1) devient

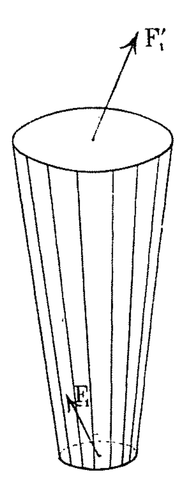
$$\Sigma f_1 \, ds_1 + \Sigma f'_1 ds'_1 = 0,$$

ou, en ne considérant que les valeurs absolues des flux de force,

$$\Sigma f_1 \, ds_1 = \Sigma f'_1 \, ds'_1.$$

Si les bases sont des portions de surfaces équipotentielles, c'est-à-

Fig. 227.



dire si la force est *uniforme* sur chacune d'elles, cette équation peut s'écrire

$$FS = F'S',$$

S et S' étant les aires totales des bases, et F et F' les forces résultantes qui leur sont respectivement appliquées.

D'ailleurs un pareil tube de force, quel qu'il soit, peut toujours être décomposé en tubes élémentaires infiniment étroits; pour chacun de ces derniers, on a

$$f ds = f_1 \, ds_1 = f'_1 \, ds'_1$$

c'est-à-dire que *la force en chaque point est en raison inverse de l'aire infiniment petite détachée par le tube dans la surface équipotentielle qui passe par ce point.*

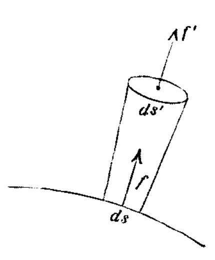
En additionnant tous ces flux, on a

$$\Sigma F_1 ds_1 = \Sigma F'_1 ds'_1.$$

Ainsi, *dans un tube de force limité par des portions de surfaces équipotentielles, le flux total qui entre dans le canal par l'une des bases est égal au flux de force qui sort par l'autre base; il est constant dans toute l'étendue du tube.*

2° En second lieu, supposons (*fig.* 228) que le tube de force

Fig. 228.



considéré ait pour base un élément ds d'une couche électrique appartenant à un système en équilibre.

Dans ce cas, on appliquera l'équation (5); la masse superficielle agissante est égale à ρds, ρ désignant la densité électrique sur l'élément de surface ds. Comme la surface latérale ne donne rien dans la sommation, le premier membre de l'équation (5) se réduira au terme $f'ds'$ fourni par la base ds'; il vient alors simplement

$$f'ds' = 2\pi\rho\, ds$$

ou, si l'on pose $ds = 1$,

$$f'ds' = 2\pi\rho.$$

Ainsi, *le flux de force émis par l'unité de surface d'une couche électrique en équilibre est constant à travers une section quelconque du tube correspondant : il est égal à* $2\pi\rho$.

Si le tube est cylindrique, on a $ds' = ds = 1$, et par suite

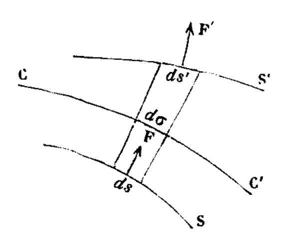
$$f' = 2\pi\rho.$$

La force électrique, due à l'unité de surface d'une couche électrique en équilibre, est constante dans toute l'étendue du tube cylindrique et égale à $2\pi\rho$.

Dans tous les cas, *la force électrique exercée par l'unité de surface d'une couche en équilibre sur un point extérieur, très voisin de sa surface, est* $2\pi\rho$.

3° Admettons (*fig.* 229) que le tube de force traverse normalement

Fig. 229.



une couche électrique en équilibre CC', et soit terminé de part et d'autre par des surfaces équipotentielles S et S'. Soit $d\sigma$ l'aire de l'élément détaché dans la couche de densité ρ. D'après l'équation (4), le flux total de force qui traverse le tube est égal au produit de 4π par la masse électrique $\rho\, d\sigma$ enfermée dans ce tube. Si F *et* F' *sont les forces résultantes du système entier, tant intérieur qu'extérieur, appliquées sur les bases* ds *et* ds', le flux de force qui entre dans le tube est $F\,ds$, et celui qui en sort est $F'\,ds'$. On a donc

$$(4\ bis) \qquad F'\,ds' - F\,ds = 4\pi\rho\, d\sigma.$$

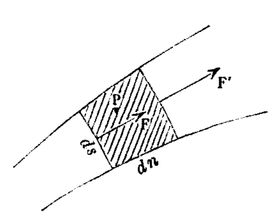
Supposons que les deux surfaces limites S et S', comprenant la couche électrisée CC', soient infiniment rapprochées; on a $ds = ds' = d\sigma$ et par suite

$$F' - F = 4\pi\rho.$$

Ainsi, *quand un tube de force traverse normalement une couche électrisée, la force électrique ou le flux de force par unité de surface varie de* $4\pi\rho$, *quand on passe d'un côté à l'autre de l'élément intercepté.*

5. **Équations de Poisson et de Laplace.** — Supposons (*fig.* 230) que le milieu, où s'exercent les forces électriques, renferme des masses agissantes distribuées d'une manière continue, et considérons un élément de volume, *dsdn*, qui serait découpé par un tube de force infiniment étroit et par deux surfaces équipotentielles distantes de *dn*. Appelons δ la densité cubique de la masse

Fig. 230.



électrique dans l'élément de volume, et V le potentiel du système en un point P de l'élément.

Le flux de force qui entre par la surface *ds* est

$$F\,ds = -\frac{dV}{dn}\,ds.$$

Le flux qui sort par la face opposée est

$$F'\,ds' = -\left(\frac{dV}{dn} + \frac{d^2V}{dn^2}dn\right)ds.$$

La différence entre le flux qui sort et le flux qui entre est donc

$$\frac{d^2V}{dn^2}\,dn\,ds.$$

Or, en vertu du théorème fondamental, démontré plus haut [équation (4 *bis*)], cette différence est égale au produit de 4π par la

masse totale d'électricité comprise dans le volume : on a donc

$$\frac{d^2V}{dn^2}\, dn\, ds = -4\pi\delta . dn ds,$$

ou

$$(6) \qquad \frac{d^2V}{dn^2} = -4\pi\delta .$$

C'est *l'équation de Poisson.*

Si l'élément de volume n'est pas électrisé, $\delta = 0$, et l'équation précédente se réduit à

$$(7) \qquad \frac{d^2V}{dn^2} = 0 .$$

C'est l'*équation de Laplace*; il y fut conduit d'abord par ses travaux sur l'attraction universelle.

Ainsi, *la dérivée seconde du potentiel, en un point* P, *par rapport à la tangente à la ligne de force, est égale et de signe contraire au produit de* 4π *par la densité cubique de la masse électrique en ce point.*

Cette dérivée est nulle quand il n'existe pas d'électricité autour du point considéré.

6. **Distribution de l'électricité en équilibre sur la surface des conducteurs.** — Le potentiel ayant une valeur constante dans toute l'étendue de chacun des conducteurs en équilibre, la dérivée $\frac{dV}{dn}$ est nulle en chaque point, et il en est de même de la dérivée seconde. On a donc

$$\frac{d^2V}{dn^2} = 0,$$

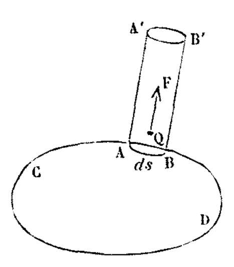
et par suite, en vertu de l'équation (6),

$$\delta = 0.$$

Ainsi, *la densité de l'électricité libre, à l'intérieur de l'un quelconque des corps conducteurs en équilibre, est nulle; et par conséquent la totalité de la charge se porte exclusivement à la surface.*

7. Force électrostatique à la surface; théorème de Coulomb. — Considérons (*fig.* 231) sur un conducteur en équilibre un élément de surface ds et de densité ρ, et prenons cet élément pour base d'un tube de force ABA'B' mené extérieurement au conducteur; soit F la force résultante appliquée au point Q infiniment voisin de l'élément, mais placé extérieurement à la couche électrique : le flux de force $F\,ds$ est constant dans toute l'étendue du tube, et l'on a vu, (n° 4, 3°) qu'en traversant une couche électrisée il varie de $4\pi\rho$ par unité de surface. Or $F = 0$ dans l'intérieur du

Fig. 231.



conducteur; en un point extérieur très voisin de la couche électrisée, on aura donc

$$F\,ds = 4\pi\rho\,ds$$

ou

$$F = 4\pi\rho.$$

Ainsi, *l'intensité du champ en un point situé en dehors d'un conducteur en équilibre et à une distance infiniment petite de la couche électrisée est égale à la densité électrique dans le voisinage de ce point multipliée par* 4π.

La force F s'appelle la *force électrostatique à la surface du conducteur*.

Le flux de force, envoyé à travers $AB = ds$ par la couche électrique ACDBA, est $4\pi\rho\,ds$. Or, le flux de force dû à l'élément superficiel $AB = ds$ est égal à $2\pi\rho\,ds$ (n° 4, 2°). Donc le flux de force envoyé à travers AB par la portion ACDB de la surface du conducteur extérieure au tube a pour valeur $2\pi\rho\,ds$.

8. **Pression électrique.** — La masse électrique, répandue sur chaque unité de surface d'un conducteur électrisé, est poussée vers l'extérieur avec une force que nous pouvons évaluer.

Considérons (*fig.* 232) l'élément AB ; la force exercée par la portion extérieure ACB du conducteur sur l'unité de charge placée en un point quelconque de AB est, d'après le n° 7, égale à $2\pi\rho$. Or la quantité d'électricité, répandue sur l'élément $AB = ds$, est $\rho\, ds$;

Fig. 232.

par suite la force exercée sur la charge totale de AB est $2\pi\rho^2 ds$; en appelant p la force exercée par unité de surface, on a

$$p = 2\pi\rho^2.$$

Cette force p a reçu le nom de *tension* ou de *pression électrique* : elle est proportionnelle au carré de la densité ρ.

D'autre part on a trouvé pour la force électrostatique

$$F = 4\pi\rho ;$$

il en résulte que

$$p = \frac{F^2}{8\pi}.$$

La pression électrique et la résistance du diélectrique environnant produisent des effets contraires.

9. **Points et éléments correspondants.** — Soit (*fig.* 233) un système de conducteurs en équilibre $A_1, A_2, \ldots, A_n$, qui ont pour potentiels respectifs $V_1, V_2, \ldots, V_n$. Les surfaces terminales de ces conducteurs seront des surfaces équipotentielles aux niveaux $V_1, V_2, \ldots, V_n$.

Du niveau V_1 au niveau V_2 se développent, dans l'air ou dans le

diélectrique environnant, des surfaces équipotentielles ayant des niveaux intermédiaires entre V_1 et V_2.

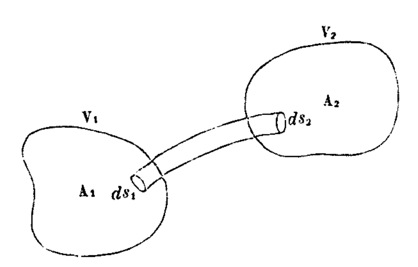
Considérons un tube de force infiniment étroit, reliant A_1 à A_2 et aboutissant normalement sur chacun de ces conducteurs : nous supposons d'ailleurs qu'il est prolongé dans l'intérieur de ceux-ci.

Les bases ds_1, ds_2, sont appelées *éléments correspondants*.

Si ces bases se réduisent à des points, les deux points ainsi déterminés sur les conducteurs seront des *points correspondants :* ils se confondent avec les extrémités d'une même ligne de force, réunissant les deux conducteurs.

Le flux de force change de $4\pi\rho\, ds$ à chacune des surfaces traver-

Fig. 233.



sées par le tube. Or, dans l'intérieur de A_1, la force est nulle; le flux de force transmis à travers ds_1 est donc $4\pi\rho_1 ds_1$: ce flux est constant dans toute l'étendue du tube. A la surface de A_2, il se produit dans le flux de force un changement égal à $4\pi\rho_2 ds_2$; comme le flux de force est nul dans l'intérieur de A_2, on a évidemment

$$4\pi\rho_1 ds_1 + 4\pi\rho_2 ds_2 = 0$$

ou

$$\rho_1 ds_1 + \rho_2 ds_2 = 0.$$

Ainsi, *les éléments correspondants d'un tube de force contiennent des quantités d'électricité égales et de signes contraires.*

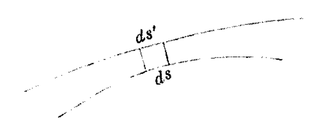
10. **Champ uniforme.** — On appelle *champ uniforme* un champ électrique dans lequel la force est en tout point constante en grandeur et en direction. Il résulte de cette définition que, dans un tel champ, les lignes de force sont des droites parallèles et les surfaces équipotentielles des plans parallèles équidistants.

Dans un champ uniforme, les tubes de force deviennent des cylindres; les éléments correspondants sont donc égaux et, par suite, les densités sont égales et de signe contraire; car on a

$$\rho_1 = -\rho_2.$$

Ce cas se présente pour le champ créé par deux plateaux conducteurs, parallèles et électrisés. On peut aussi l'étendre au champ

Fig. 234.



créé par deux conducteurs infiniment voisins de forme quelconque, parce que les tubes de force étant très petits ont des bases ds et ds' (*fig.* 234) sensiblement égales.

11. **Méthode de Faraday pour l'exploration d'un champ électrique.** — Le champ électrique, exploré jusqu'ici au moyen des tubes de force, peut encore être exploré à l'aide d'une autre méthode qui est due à Faraday, et qui repose sur le théorème suivant démontré par Clerk Maxwell :

L'intensité du champ en un point donné est proportionnelle au nombre des lignes de force qui traversent l'unité d'aire de la surface équipotentielle passant en ce point.

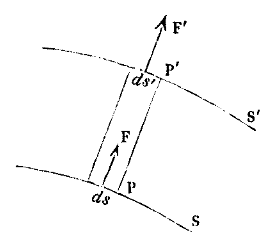
Soient (*fig.* 235) deux surfaces équipotentielles S et S', et un tube de force élémentaire reliant ces deux surfaces : on a (n° 4)

$$F\,ds = F'\,ds'.$$

Appelons n le nombre de lignes de force qui traversent l'unité de

surface en P : le nombre de lignes qui franchissent l'élément ds est évidemment $n\,ds$. Ce nombre est constant dans toute l'étendue du tube; mais, comme ce tube va en s'évasant à mesure que les potentiels décroissent, le nombre de lignes de force qui traversent l'unité de surface va en diminuant. Il s'ensuit qu'en P′, par

Fig. 235.



exemple, le nombre de ces lignes pour l'unité de surface est devenu n', n' étant plus petit que n. Mais on a toujours

$$n\,ds = n'\,ds'.$$

Cette relation rapprochée de la précédente donne la proportion

$$\frac{F}{n} = \frac{F'}{n'}.$$

Si donc on trace les lignes de force de telle façon que, en un point quelconque de leur trajectoire, le nombre de lignes issues de l'unité de surface soit numériquement égal au nombre qui mesure, en ce point, l'intensité du champ, cette intensité sera encore exactement représentée en tout autre point par le nombre de lignes comprises dans l'unité de surface.

Le nombre des lignes qui traversent un centimètre carré de chaque surface équipotentielle est en raison inverse de la longueur du segment de normale compris entre cette surface et la surface d'un ordre immédiatement inférieur.

NOTE VIII.

VÉRIFICATIONS DE LA LOI DE COULOMB.

1. La théorie du potentiel, fondée sur la loi de Coulomb, nous a conduit à cette conséquence que, dans les conducteurs en équilibre, l'électricité réside exclusivement à la surface des conducteurs. Or ce dernier fait expérimental est facile à vérifier; en le prenant pour point de départ, on peut en déduire comme conséquence nécessaire la loi même de Coulomb.

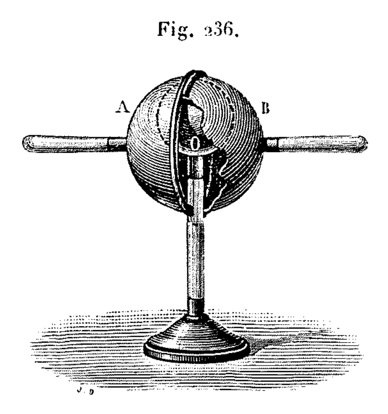
2. Les premières observations relatives à la distribution de l'électricité sont dues à Coulomb.

La boule fixe de la balance étant formée d'une sphère de cuivre électrisée, Coulomb mesurait la répulsion exercée sur la boule mobile à une distance angulaire déterminée. Puis, après avoir retiré de la balance la sphère de cuivre, il la touchait successivement avec d'autres sphères conductrices, de nature quelconque, mais de même diamètre, à l'état neutre. La première sphère cédait à chacune des autres la moitié de son électricité; car, reportée dans la balance, elle exerçait une répulsion moitié moindre sur la boule mobile. Coulomb obtint le même résultat avec deux disques égaux, l'un en papier, l'autre en fer; mais le partage de l'électricité ne se fait plus également entre un disque et une sphère. Ainsi, *la répartition de l'électricité entre les corps mis en contact est indépendante de leur nature; elle ne dépend que de leur forme et de leurs dimensions.*

Coulomb montra de même que l'électricité se distribue entre les corps en contact, non en *raison des masses*, mais en *raison des surfaces*.

3. Pour démontrer que l'électricité se répand exclusivement à la surface, Faraday construisit une chambre cubique de douze pieds de côté, recouverte de toiles métalliques et suspendue par des câbles de soie ou isolée par des pieds de verre; cette sorte de

Fig. 236.



cage fut fortement électrisée par une machine électrique puissante. Faraday s'y enferma lui-même avec des électroscopes à feuille d'or très sensibles, et constata que nulle part il n'y avait trace de divergence dans les lames; cependant les parois étaient électrisées si fortement que des aigrettes s'en échappaient spontanément et qu'on pouvait en tirer du dehors de fortes étincelles.

Aucune force électrique n'existe donc à l'intérieur d'un corps conducteur électrisé, fermé de toutes parts, à moins toutefois que ce conducteur ne contienne d'autres corps électrisés et isolés de sa surface.

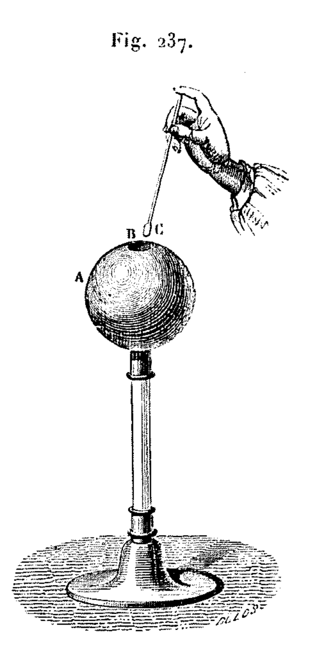
Cette expérience de Faraday démontre qu'il n'y a aucun champ de force électrique dans la substance d'un conducteur; que, par suite, *tout champ électrique est limité ou borné par des surfaces conductrices et est constitué entièrement par des corps*

non conducteurs, c'est-à-dire par des *diélectriques*. C'est seulement dans ces derniers corps que la force électrique peut exister ou se propager.

4. Comme ces expériences sont difficiles à répéter dans les cours, on y substitue en général les suivantes :

1° On prend une sphère métallique isolée O (*fig.* 236), et on la recouvre, comme le montre la figure, avec deux calottes hémisphé-

Fig. 237.



riques A et B, dont le rayon est notablement plus grand que celui de la sphère et qui sont munies de manches en verre. Quand l'enveloppe que forment ces calottes est entièrement fermée, on établit leur contact avec la sphère et on électrise tout le système. Puis on supprime le contact avec O en relevant les hémisphères toujours appliqués l'un contre l'autre, et enfin on les sépare. On approche successivement d'un pendule électrique, d'abord la sphère, puis

les calottes qui la recouvraient; on constate que ces dernières sont fortement électrisées, et que la sphère est à l'état naturel.

2° Sur un pied isolant (*fig.* 237), on place un conducteur creux, par exemple une sphère A percée d'un trou B à sa partie supérieure. On la charge d'électricité; puis on applique sur sa surface un plan d'épreuve, formé d'un petit disque de clinquant isolé C, qui prend au point de contact une certaine quantité de fluide. Si le contact a lieu à l'intérieur, le plan d'épreuve ne ramène aucune électricité et reste à l'état naturel; il se charge toujours quand on touche la surface extérieure, même très près des bords du trou.

5. **Preuve mathématique de la loi de Coulomb.** — Les expériences précédentes établissent que la charge électrique d'un corps conducteur se porte exclusivement à la surface et qu'à l'intérieur il n'y a ni électricité ni force électrique. On peut montrer qu'elles entraînent comme conséquence l'*exactitude rigoureuse* de la loi de Coulomb : vérification indirecte d'une réelle importance, car les mesures effectuées avec la balance de torsion sont affectées d'erreurs inévitables.

Voici une démonstration très simple due à M. Bertrand.

Appelons $\varphi(r)$ l'action exercée à la distance r par la masse 1 sur la masse 1, et posons $r^2\varphi(r) = F(r)$: je dis que $F(r)$ est constant. S'il ne l'est pas, il augmentera ou diminuera avec r. Supposons qu'il augmente, et soient r_1 et r_2 deux limites assez rapprochées pour que $F(r)$ augmente *toujours* quand r varie de r_1 à r_2.

Concevons (*fig.* 238) une couche électrique sphérique, homogène et infiniment mince, de diamètre $AB = r_1 + r_2$, et considérons une molécule de fluide neutre placée sur le diamètre AB, en un point P tel que $AP = r_1$, $BP = r_2$. Par ce point P menons un plan RS, perpendiculaire à AB, qui divise la sphère en deux zones RAS et RBS. Je dis que le point P, attiré en sens contraire par ces deux zones supposées homogènes, ne peut rester en équilibre que si $F(r)$ est constant.

Concevons, en effet, les deux nappes d'un cône d'ouverture infiniment petite $d\omega$, et de sommet P, lesquelles coupent la couche en KK′ et en HH′. Les attractions des éléments KK′ et HH′ sur P diri-

gées en sens contraires, suivant l'axe commun HK, seront respectivement

$$KK' \times \varphi(PK),$$

et

$$HH' \times \varphi(PH).$$

Soient V_1 et V_2 les angles sous lesquels l'axe commun HK coupe la sphère; et menons de P comme centre et avec les rayons PK et PH les arcs infiniment petits KK_1 et HH_1. On a

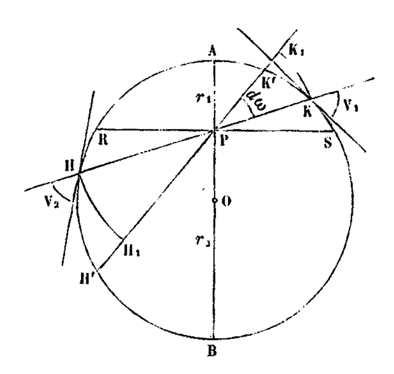
$$KK' = \frac{KK}{\sin V_1} = \frac{d\omega.\overline{PK}^2}{\sin V_1},$$

et

$$HH' = \frac{HH_1}{\sin V_2} = \frac{d\omega.\overline{PH}^2}{\sin V_2}.$$

Les angles V_1 et V_2 sont égaux. Si donc on pose $PK = \rho_1$ et

Fig. 238.



$PH = \rho_2$, les deux actions sont entre elles comme

$$\rho_1^2 \varphi(\rho_1) \quad \text{et} \quad \rho_2^2 \varphi(\rho_2),$$

ou comme

$$F(\rho_1) \quad \text{et} \quad F(\rho_2).$$

Or ρ_1 et ρ_2 sont compris entre r_1 et r_2; puisque ρ_2 est plus

grand que ρ_1, il résulte de la supposition précédente que F (ρ_2) est plus grand que $F(\rho_1)$. S'il en est ainsi, toutes les actions dirigées au-dessous de RS l'emportent une à une sur les actions correspondantes dirigées au-dessus, et par conséquent le point P sera tiré vers le bas. Il n'est donc pas en équilibre. La supposition que nous avons faite est donc inadmissible, et il faut que $F(r)$ soit une constante k, d'où

$$\varphi(r) = \frac{k}{r_2}.$$

C'est la loi même de Coulomb.

NOTE IX.

SUR L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

1. Quand on relie au sol différents conducteurs électrisés, le système revient de lui-même à l'état neutre; il y a mouvement de l'électricité sous l'influence des forces électriques du système, et par suite production d'un travail *positif*. Il en est de même quand on met en communication les conducteurs pour égaliser leurs potentiels, ou bien encore quand la distribution des couches est modifiée à la surface des conducteurs par une déformation *spontanée* du système.

Un système électrisé contient donc une certaine quantité d'énergie disponible correspondant au travail accompli : cette énergie est à l'*état potentiel*, tant que l'équilibre subsiste.

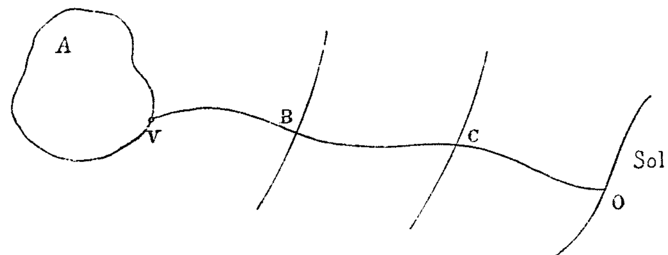
Réciproquement, pour effectuer l'électrisation d'un système, il faut dépenser une quantité de travail égale à l'énergie acquise par le système dans ce nouvel état.

De ces observations il suit qu'on peut évaluer l'énergie potentielle d'un système de corps électrisés, soit par le travail dépensé contre les forces du champ pendant l'électrisation, soit par le travail accompli par ces forces pendant la décharge.

2. **Énergie d'un conducteur isolé.** — Considérons (*fig.* 239) un corps électrisé A ayant une charge $+M$ et un potentiel V. La surface du conducteur est une surface de niveau, et l'on peut con-

cevoir autour de ce conducteur une série de surfaces de niveau sur lesquelles le potentiel va en décroissant d'une façon continue; lorsque ces surfaces atteignent l'infini, le potentiel devient nul. Or nous avons vu qu'une masse d'électricité, égale à l'unité, en passant d'un point B à un autre point C du champ électrique, effectue à l'encontre ou sous l'influence des forces du champ un travail *négatif* ou *positif* numériquement égal à la différence des potentiels des deux points. Donc, en descendant de niveau en niveau d'un point quelconque du conducteur A jusqu'à la surface à potentiel nul ou jusqu'à l'infini, la charge unité effectue un travail

Fig. 239.



positif égal à V, quelle que soit la forme de la trajectoire parcourue.

Si la masse électrique qui se meut est dm, au lieu d'être l'unité de quantité, le travail élémentaire produit ou l'énergie dépensée est

$$dW = V\,dm = \frac{M}{C}\,dm,$$

en désignant par C la capacité du conducteur A.

Imaginons maintenant que, par les transports successifs de petites masses électriques dm depuis le corps jusqu'à l'infini, on enlève au conducteur sa charge M; le conducteur électrisé revient à l'état neutre et le travail total accompli par les forces du champ sera

$$W = \frac{1}{C}\int_0^M M\,dm = \frac{M^2}{2C},$$

ou

$$W = \frac{1}{2}\frac{M^2}{C} = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}MV.$$

La fonction W représente le travail qui était emmagasiné sous forme d'énergie potentielle dans le conducteur.

Ainsi, *l'énergie électrique d'un conducteur unique isolé, c'est-à-dire la quantité de travail, ou de force vive qu'il développe quand on le décharge, est égale à la moitié du produit de sa charge par son potentiel.*

Elle est aussi proportionnelle au carré de la charge ou au carré du potentiel.

Réciproquement, le principe de la conservation de l'énergie nous apprend que, pour charger le conducteur A au potentiel V par le transport de petites masses électriques amenées de l'infini jusqu'à ce corps, il faudrait dépenser contre les forces du champ une quantité de travail $\frac{1}{2}$ MV égale à la quantité de force vive produite pendant la décharge complète.

On peut arriver à la démonstration de la formule précédente par une méthode graphique :

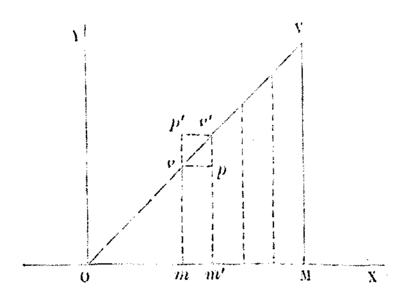
L'état électrique d'un corps conducteur isolé est évidemment déterminé lorsqu'on connaît sa charge électrique M et son potentiel V.

Traçons (*fig.* 240) deux axes rectangulaires OX et OY, et prenons sur le premier l'abscisse $Om = m$; si nous élevons l'ordonnée $mv = v$, le sommet v de cette ordonnée répond à un état électrique déterminé du corps. *L'origine* O du diagramme indique l'état initial du conducteur dépourvu de charge et au potentiel zéro.

Si le conducteur reçoit un accroissement dm de charge, qui correspond à un accroissement dv de potentiel, le point figuratif prend la position infiniment voisine v', pour laquelle on a $Om' = m + dm$ et $m'v' = v + dv$. Il y a lieu de remarquer que l'accroissement du potentiel étant toujours proportionnel à l'accroissement de la charge, la ligne décrite par le point figuratif et représentant sur le diagramme la succession des états électriques du conducteur

est une ligne droite *issue de l'origine* O. Concevons que l'on charge le conducteur depuis O jusqu'à M par des additions continues et successives de masses élémentaires dm amenées de l'infini, et construisons les trapèzes correspondants tels que $mm'vv'$. Le potentiel étant mv avant l'addition de la charge élémentaire mm' est devenu $m'v'$ après cette addition. Or le travail dépensé a évidemment pour valeur numérique la moyenne des produits $v dm$ et $(v + dv)\, dm$; il est donc représenté par l'aire du trapèze élémentaire $mm'vv'$. Soit V la position du point figuratif, qui indique l'état final, et dont les coordonnées sont $OM = M$ et $MV = V$; l'énergie potentielle totale communiquée au conducteur est repré-

Fig. 240.



entée par la somme de tous ces trapèzes élémentaires, c'est-à-dire par l'aire du triangle OMV ou $\frac{1}{2}$ MV.

Il n'est pas inutile de remarquer que la présence du coefficient $\frac{1}{2}$, dans l'expression qui donne l'énergie d'un corps électrisé, tient à ce que l'électricité s'écoule à la façon d'un fluide. Quand une masse d'eau s'écoule par un orifice pratiqué à la base d'un cylindre, on estime le travail accompli en multipliant la masse totale par la hauteur de chute comptée à partir du niveau moyen; de même, pour évaluer le travail produit dans la décharge d'un corps électrisé, on doit multiplier la quantité d'électricité écoulée par la moyenne des niveaux potentiels au commencement et à la fin de la décharge.

3. Énergie d'un système de conducteurs électrisés. — Considérons maintenant un système de conducteurs électrisés A_1, $A_2, \ldots$, isolés les uns des autres, et ayant des charges M_1, $M_2, \ldots$ avec des potentiels V_1, $V_2, \ldots$. Si l'on multiplie en chaque point la densité par n, on obtient un nouvel état d'équilibre dans lequel les charges totales deviennent respectivement nM_1, nM_2, ... et les potentiels nV_1, nV_2 .... Changeons maintenant n en $n + dn$ dans toutes ces expressions. Cela revient à augmenter la charge de chaque conducteur A_1, A_2 ... respectivement de $M_1 dn$, $M_2 dn$, ..., et le potentiel correspondant de $V_1 dn$, $V_2 dn$, ... Pour augmenter de $M_1 dn$ la charge nM_1 du conducteur A_1, il faut amener de l'infini ou d'une distance où l'action du système est nulle, jusque sur ce conducteur, une quantité $M_1 dn$ d'électricité. Or le potentiel de A_1, avant l'addition de cette charge, est nV_1 ; il devient ensuite $(n + dn)V_1$. Le travail dépensé est donc compris entre

$$nV_1M_1 dn \quad \text{et} \quad (n + dn)V_1M_1 dn,$$

et, en négligeant un infiniment petit du second ordre, il est égal à

$$M_1V_1 n\, dn.$$

Il en est de même pour les autres conducteurs, en sorte que le travail total dépensé pour accroître la charge du système, ou la variation d'énergie de celui-ci, est

$$dW = (M_1V_1 + M_2V_2 + \ldots)n\,dn = n\,dn\,\Sigma MV.$$

Si l'on répète cette opération un très grand nombre de fois avec des charges infiniment petites, jusqu'à ce que l'effet total devienne sensible, le travail dépensé sera

$$\Sigma MV \int n\,dn = \frac{1}{2}\Sigma MV(n_1^2 - n_0^2),$$

n_0 et n_1 étant les valeurs initiale et finale de n. En faisant $n_0 = 0$ et $n_1 = 1$, on a le travail nécessaire pour amener chaque conducteur du système, pris à l'état neutre, aux degrés de charge et de potentiel considérés en premier lieu ; il vient alors simplement

$$W = \frac{1}{2}\Sigma MV \tag{1}$$

Ainsi, *l'énergie électrique d'un système de conducteurs est égale à la demi-somme des produits du potentiel de chaque conducteur par la quantité d'électricité qu'il renferme.*

L'énergie électrique, que le système acquiert par le travail W dépensé contre les forces électriques, est indépendante de *l'ordre* suivant lequel on opère la charge des différents conducteurs. Bien que chaque addition de charge modifie non seulement le potentiel du corps chargé, mais encore, par voie d'induction, le potentiel de chacun des autres corps du système, l'ordre suivant lequel s'effectuent la charge et la décharge ne saurait exercer aucune influence sur le résultat. S'il en était autrement, en chargeant continuement un système dans un ordre donné, et le déchargeant dans un ordre différent, on réaliserait à la fin de chaque cycle d'opérations une production de force vive ou un gain d'énergie, sans dépense équivalente, ce qui est contraire au principe *de la conservation de l'énergie.*

4. A la formule fondamentale

$$W = \frac{1}{2} \Sigma MV$$

peuvent se rattacher les remarques suivantes.

1° Lorsque l'un des corps du système est resté isolé pendant la charge, il ne peut être électrisé que par influence et contient alors des quantités égales des deux électricités contraires. La charge M est nulle, et par suite le terme correspondant dans l'expression de l'énergie est nul.

2° Si, pendant la charge, un des corps du système communique avec le sol, M est différent de zéro; mais le potentiel V est nul; donc le terme MV correspondant à ce corps est nul.

Cependant ces deux sortes de conducteurs interviennent pour modifier l'énergie totale; car ils font varier par induction les capacités et, par suite, les potentiels des autres corps électrisés et isolés.

C'est ce qui a lieu avec des condensateurs dont l'une des armatures est mise en communication avec le sol.

5. **Théorème de Gauss (déduit du principe de l'énergie).** — Considérons un conducteur de charge M, au potentiel V, dont l'énergie potentielle est $\frac{MV}{2}$; si nous faisons varier la charge de M à M', le potentiel variera de V à V', et l'accroissement d'énergie, égal au travail électrique dépensé pour amener la charge additionnelle M' — M de l'infini sur le conducteur, est représenté par l'aire du trapèze ayant pour bases V et V' et pour hauteur M' — M, c'est-à-dire par

$$(M' - M)\frac{V + V'}{2}.$$

On aura donc pour l'énergie finale du conducteur donné

$$\frac{1}{2}M'V' = \frac{1}{2}MV + (M' - M)\frac{V' + V}{2},$$

d'où, après simplification,

$$MV' = M'V.$$

Pour un système de conducteurs on aura

$$\Sigma MV' = \Sigma M'V. \tag{2}$$

C'est le *théorème de Gauss*, que l'on peut énoncer ainsi :

Dans un système de conducteurs fixes, si l'on considère deux états d'équilibre distincts, la somme des produits de la charge initiale de chaque conducteur et de son potentiel final est égale à la somme des produits du potentiel primitif et de la charge finale.

Cette proposition de Gauss devient une pure identité si l'on remplace les potentiels par les expressions que fournit leur définition.

Ici nous sommes arrivés à cette relation, indépendamment de toute forme analytique attribuée à la fonction V.

Corollaire. Des deux membres de l'égalité (2), retranchons MV et posons $M' - M = \mu$ et $V' - V = u$; il viendra

$$\Sigma M u = \Sigma V \mu, \tag{3}$$

et, si la modification simultanée des charges et des potentiels est infiniment petite,

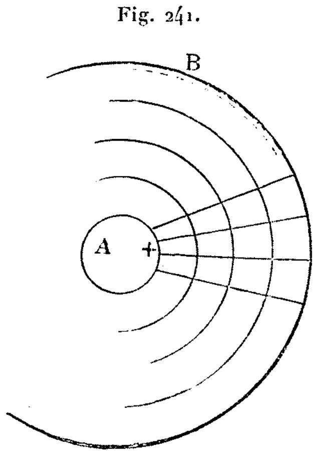
$$\Sigma M \delta V = \Sigma V \delta M \tag{4}$$

d'où ce théorème, conséquence du principe de Gauss :

Dans un système de conducteurs fixes, où l'on considère deux états d'équilibre distincts, la somme des produits de la charge initiale de chaque conducteur et de la variation de son potentiel d'un état à l'autre est égale à la somme des produits du potentiel initial et de la variation de la charge.

6. Représentation graphique de l'énergie d'un système. — 1° Considérons d'abord le cas le plus simple, c'est-à-dire

Fig. 241.



(*fig.* 241) celui d'un seul corps A, électrisé positivement, qui serait placé à l'intérieur d'une enveloppe conductrice B. Tous les tubes de force (¹) naissent à la surface du corps électrisé positivement et finissent à la surface interne de B électrisée négativement. Le nombre de ces tubes, que l'on suppose des *tubes-unité*, c'est-à-dire correspondant sur le conducteur A à une portion de surface telle qu'elle contienne l'unité de charge, est égal au nombre d'unités

(¹) Clerk-Maxwell appelle les tubes de force *tubes d'induction*.

électriques contenues dans la charge de A; chacun de ces tubes coupe toutes les surfaces équipotentielles qui enveloppent A et sont enveloppées par B; il est donc divisé en un certain nombre de tronçons ou *cellules*, et ce nombre de cellules est représenté par la différence de potentiel entre A et B.

Soient M la charge du corps A, V son potentiel, M′ et V′ la charge et le potentiel de B. Le nombre total de cellules est évidemment égal au produit du nombre M de tubes-unité par le nombre $V - V'$ des surfaces équipotentielles de la série entre A et B : il a donc pour expression

$$M(V - V');$$

mais, d'après le théorème de Faraday, on a $M' = -M$. L'expression précédente peut donc s'écrire

$$MV + M'V',$$

et, sous cette forme, on reconnaît le double de l'expression que nous avons obtenue pour l'énergie électrique du système [A.B].

Ainsi, dans ce cas simple, *le nombre de cellules est double du nombre d'unités d'énergie électrique contenues dans le système.*

2° Considérons maintenant (*fig.* 242) plusieurs corps électrisés A, B, C, contenus dans l'intérieur d'une enveloppe O. Soient M_1, M_2, M_3 les charges de A, B, C, et V_1, V_2, V_3 leurs potentiels; la charge et le potentiel de l'enveloppe seront désignés par M_0 et V_0. Nous supposerons que les potentiels de A, B, C sont inégaux, et, pour fixer les idées, nous poserons

$$V_1 > V_2 > V_3 > V_0.$$

Imaginons tracés les tubes de force-unité auxquels donnent lieu les différents conducteurs du système. Puisque le corps A a le potentiel le plus élevé, il *émet* des tubes de force et n'en *absorbe* pas; puisque l'enveloppe O a le potentiel le plus bas, elle *absorbe* des tubes de force et n'en *émet* pas.

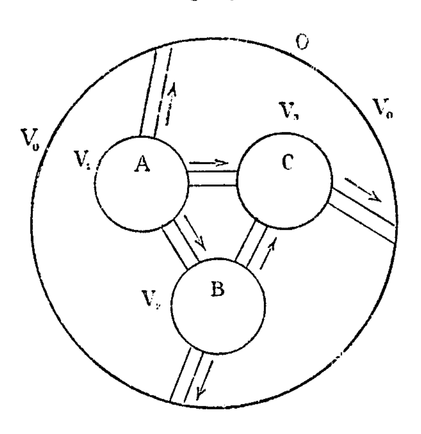
Les corps B et C à potentiels intermédiaires entre V_1 et V_0 émettent et absorbent des tubes de forces; ainsi B reçoit des tubes de A seulement et en envoie à C et à l'enveloppe; C reçoit des tubes de A et de B et en envoie à l'enveloppe.

Appelons M_{AB}, M_{AC}, M_{AO} le nombre de tubes qui passent de A aux conducteurs B et C, et à l'enveloppe O respectivement; le nombre total des cellules délimitées sur ces tubes sera

$$M_{AB}(V_1 - V_2) + M_{AC}(V_1 - V_3) + M_{AO}(V_1 - V_0).$$

Si nous appelons M_{BC} et M_{BO} les nombres de tubes qui passent de

Fig. 242.



B à C et à O, le nombre total de cellules découpées par ces tubes sera pareillement

$$M_{BC}(V_2 - V_3) + M_{BO}(V_2 - V_0).$$

Enfin, en désignant par M_{CO} le nombre des tubes qui passent de C à l'enveloppe, on a pour le nombre des cellules correspondantes

$$M_{CO}(V_3 - V_0).$$

Ordonnons tous ces termes suivant les potentiels qu'ils renferment; nous remarquerons ici que, si M_{AB} désigne le nombre de tubes qui passent de A en B, M_{BA} doit représenter le nombre de tubes qui passent de B à A; or, les extrémités de ces tubes ont des charges égales et de signes contraires; on peut donc écrire

$$M_{BA} = -M_{AB}.$$

En faisant la somme de toutes les cellules, on trouve, au moyen de cette relation,

$$\begin{aligned} & V_1(M_{AB} + M_{AC} + M_{AO}) \\ + & V_2(M_{BC} + M_{BO} + M_{BA}) \\ + & V_3(M_{CO} + M_{CA} + M_{CB}) \\ + & V_0(M_{OA} + M_{OB} + M_{OC}). \end{aligned}$$

Or le facteur de V_1, représentant le nombre total des tubes qui sortent de A, est égal à M_1, qui exprime la charge de A ; de même les facteurs de V_2, V_3, V_0 désignent respectivement les charges M_2, M_3, M_0. La somme des cellules est donc

$$M_0V_0 + M_1V_1 + M_2V_2 + M_3V_3,$$

c'est-à-dire le double de l'énergie du système.

Ainsi, *quand un système est formé de plusieurs corps électrisés, le nombre des cellules est encore double du nombre d'unités d'énergie électrique contenues dans le système.*

7. **Modification de l'énergie d'un système.** -- L'énergie électrique d'un système peut se modifier de deux manières différentes :

1° *Par l'écoulement de l'électricité* d'un corps sur un autre corps ou dans le sol. Dans ce cas, l'énergie électrique est employée soit à vaincre la résistance de l'air en donnant naissance à une étincelle, soit à échauffer les conducteurs en se transformant en chaleur, soit à produire des effets mécaniques, physiques ou chimiques.

La somme de tous ces effets de la décharge, rapportés à des unités convenablement choisies, est équivalente à la variation d'énergie du système modifié.

2° *Par un changement dans la position relative des conducteurs, sans qu'aucune communication ne soit établie entre eux.*

Nous considérerons deux cas particuliers relatifs à cette dernière sorte de modification d'énergie.

I. Les conducteurs sont isolés et leurs charges sont constantes. — Soit un système de conducteurs électrisés A_1,

$A_2, \ldots, A_n$, que nous supposons isolés les uns des autres et de la terre. Si le système éprouve une déformation, c'est-à-dire si la position relative de ces conducteurs vient à changer, il y a en général production sur chaque conducteur d'un travail *positif* ou *négatif*, suivant que le déplacement de ce conducteur a lieu sous l'influence ou à l'encontre des forces du champ.

Si, par l'action d'un agent extérieur, le déplacement est effectué dans la direction inverse de celle du champ (comme il arrive avec deux corps électrisés de la même manière, que l'on rapproche l'un de l'autre), on est obligé de vaincre les répulsions électriques et de développer un travail négatif. Ce travail doit se retrouver à l'état potentiel sous forme d'une augmentation équivalente d'énergie électrique. En appelant dT le travail élémentaire dépensé pour le déplacement infiniment petit ds, et dW l'augmentation correspondante d'énergie, on a, pendant chaque intervalle de temps dt,

$$dT = dW = d\left(\frac{1}{2}\Sigma MV\right)$$

ou

$$dT = \frac{1}{2}\Sigma M dV + \frac{1}{2}\Sigma V dM.$$

Dans le cas actuel, et puisque les charges ne changent pas, il reste

$$dT = \frac{1}{2}\Sigma M dV.$$

Donc, *tout déplacement correspondant à un travail négatif tend à accroître les potentiels des conducteurs.*

Si les conducteurs sont abandonnés à eux-mêmes, ils obéiront à leurs attractions ou répulsions mutuelles. Le travail de ces forces est nécessairement positif, et, comme il est emprunté à l'électrisation des conducteurs, il y a diminution proportionnelle de l'énergie du système. On a donc dans ce cas

$$dT = -dW,$$

et, par suite,

$$dT = -\frac{1}{2}\Sigma M dV.$$

Ainsi, *la déformation spontanée d'un système, abandonné à lui-même et soustrait à toute influence extérieure, s'accomplit de telle sorte que les potentiels diminuent, et l'énergie tend vers une valeur minimum.*

II. Les conducteurs sont maintenus a des potentiels constants et abandonnés a leurs actions mutuelles. — Supposons à l'origine chaque conducteur A_1, A_2, ... isolé, et laissons le système se déformer spontanément, c'est-à-dire sans aucune intervention d'énergie étrangère. Les charges M_1, M_2, ... ne changent pas; il y a pour les potentiels respectifs les chutes δV_1, δV_2, ... La perte d'énergie, égale au travail positif accompli, est, comme on l'a vu,

$$\delta W = -\frac{1}{2}\Sigma M \delta V.$$

Relions maintenant les conducteurs à des piles constantes, ou à des sources électriques placées en dehors du champ d'action, afin de ramener les potentiels à leurs valeurs primitives : nous admettons d'ailleurs que les conducteurs sont maintenus fixes. Le rétablissement des potentiels ne peut avoir lieu sans que les charges primitives s'accroissent des charges additionnelles δM_1, δM_2, ..., réglées par la relation (4)]

$$\Sigma M \delta V = \Sigma V \delta M,$$

qui se rapporte à deux états d'équilibre du système, le premier avant l'application des piles, le deuxième après cette application. La variation *positive* de l'énergie initiale, c'est-à-dire l'augmentation de l'énergie initiale, due à cet accroissement de charge, sera

$$\delta' W = \frac{1}{2}\Sigma V \delta M = \frac{1}{2}\Sigma M \delta V.$$

On en conclut

$$\delta' W = -\delta W.$$

De plus, $\delta' W - \delta W$, c'est-à-dire le gain total de l'énergie, ou la différence entre l'augmentation d'énergie $\delta' W$, due à ce que les potentiels reprennent leur valeur primitive, et la diminution d'énergie δW, due au travail mécanique qui a été accompli dans la

déformation, est donné par la relation

$$\delta' W - \delta W = 2\delta' W = \Sigma M \delta V.$$

Ainsi, *lorsque les conducteurs sont reliés à des piles, qui maintiennent leurs potentiels constants, l'énergie s'accroît pendant leur mouvement et tend vers un maximum.*

Le travail mécanique accompli pendant le déplacement spontané est égal à l'accroissement d'énergie du système.

L'énergie fournie par les sources est égale au double de l'une ou l'autre de ces quantités, et est dépensée moitié en travail mécanique, moitié en travail électrique ou énergie potentielle.

NOTE X.

THÉORÈMES GÉNÉRAUX SUR L'INFLUENCE ÉLECTRIQUE.

1. Considérons un système de n conducteurs, chargés d'une quantité donnée d'électricité et soumis à leur influence mutuelle. Le problème général de l'influence électrique consiste à déterminer en chaque point de la surface des conducteurs la densité superficielle ρ. Dans l'état d'équilibre cette dernière est donnée par l'équation

$$\rho = -\frac{1}{4\pi}\frac{dV}{dn}.$$

Pour résoudre le problème, il faut donc déterminer la fonction V des coordonnées, qui fournit le potentiel en chaque point.

On ne connaît pas la solution générale de ce problème; toutefois il a été résolu d'une manière complète dans quelques cas particuliers. Sans aborder cette question, nous démontrerons ici quelques théorèmes intéressants et d'une application fréquente.

2. **Relations entre les charges et les potentiels.** — Théorème I. — *Dans un système de n conducteurs en équilibre, la charge de l'un quelconque de ces conducteurs est une fonction linéaire des potentiels de tous les autres.*

Soient $A_1, A_2, \ldots, A_n$ les n conducteurs, tous à l'origine reliés au sol, c'est-à-dire au potentiel zéro.

Isolons A_1 seul, et portons-le au potentiel V_1; l'effet de cet

accroissement de potentiel sera d'élever la charge de A_1 de o à m_1^1 et d'induire sur les autres conducteurs les charges m_2^1, m_3^2, ..., m_n^1. Posons

$$m_1^1 = c_1^1 V_1, \quad m_2^1 = c_2^1 V_1, \quad \ldots, \quad m_n^1 = c_n^1 V_1.$$

Ces multiplicateurs $c_1^1, c_2^1, c_3^1, \ldots, c_n^1$ sont appelés *coefficients d'induction*; c_2^1, c_3^1, ..., c_n^1 sont les charges induites respectivement par A_1 sur A_2, A_3, ..., A_n lorsque A_1 est maintenu au potentiel 1, tous les autres conducteurs étant au potentiel zéro; c_2^1 est dit le *coefficient d'induction* de A_1 sur A_2, c_3^1 le *coefficient d'induction* de A_1 sur A_3, et ainsi de suite. Quant à c_1^1, il est numériquement égal à la quantité d'électricité existant sur A_1, lorsque A_1 est au potentiel 1 et que tous les autres conducteurs sont au potentiel zéro. On pourrait l'appeler *coefficient d'induction de* A_1 *sur lui-même;* on le dénomme ordinairement la *capacité électrostatique* de A_1.

Tous ces coefficients dépendent évidemment de la forme et de la position des conducteurs du système.

Déchargeons A_1 en le mettant en communication avec le sol; isolons A_2 et portons-le au potentiel V_2. Dans ce second état d'équilibre on aura pour les charges acquise sur A_2 et induites sur les conducteurs A_1, A_3, ..., A_n,

$$m_1^2 = c_1^2 V_2, \quad m_2^2 = c_2^2 V_2, \quad \ldots, \quad m_2^n = c_n^2 V_2;$$

c_2^2 est la capacité de A_2, et $c_1^2, c_3^2, \ldots, c_n^2$ sont les coefficients d'induction de A_2 sur A_1, A_3, ..., A_n : nous pouvons répéter la même opération pour chaque conducteur.

Enfin, isolons le conducteur A_n, et portons-le au potentiel V_n; nous aurons de nouvelles égalités correspondant à un $n^{\text{ième}}$ état d'équilibre,

$$m_1^n = c_1^n V_n, \quad m_2^n = c_2^n V_n, \quad \ldots, \quad m_n^n = c_n^n V_n.$$

D'une manière générale, $m_s^r = c_s^r V_r$ est la charge induite par A_r au potentiel V_r sur A_s au potentiel zéro. De même $m_r^s = c_r^s V_s$ est la charge induite par A_s au potentiel V_s sur A_r maintenu au potentiel zéro, ainsi que tous les autres conducteurs du système.

Superposons maintenant ces n états d'équilibre obtenus succes-

sivement ; nous aurons un $(n+1)^{\text{ième}}$ état d'équilibre résultant, qui n'est autre chose que l'état final atteint d'un seul coup lorsqu'on attribue simultanément à tous les conducteurs leurs charges respectives. En faisant l'addition des charges acquise ou induite pour chaque conducteur, on trouve

$$(1)\quad \begin{cases} M_1 = c_1^1 V_1 + c_1^2 V_2 + \ldots + c_1^s V_s + \ldots + c_1^n V_n, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ M_r = c_r^1 V_1 + c_r^2 V_2 + \ldots + c_r^s V_s + \ldots + c_r^n V_n, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ M_n = c_n^1 V_1 + c_n^2 V_2 + \ldots + c_n^s V_s + \ldots + c_n^n V_n. \end{cases}$$

Telles sont les n équations linéaires qui expriment les charges en fonction des potentiels.

THÉORÈME II (*Théorème de Riemann*). — La détermination des n charges M_1, M_2, ... paraît, d'après les équations (1), dépendre de n^2 coefficients. Mais nous allons établir que l'on a en général

$$(2)\qquad c_s^r = c_r^s,$$

ce qui réduit le nombre des coefficients distincts à

$$n + \frac{n^2 - n}{2} = \frac{n(n+1)}{2}.$$

Cette relation est connue sous le nom de *Théorème de Riemann*.

Considérons les deux états d'équilibre suivants : dans le premier état, les potentiels de tous les corps sont nuls, à l'exception du potentiel V_r auquel est porté le conducteur A_r; dans le second état, les potentiels sont nuls, à l'exception du potentiel V_s de A_s. L'application du théorème de Gauss donne immédiatement la relation (2). Pour le vérifier, formons l'équation

$$\Sigma MV' = \Sigma M'V.$$

Pour tout conducteur, A_t par exemple, maintenu au potentiel zéro, à la fois dans le premier et dans le deuxième état, on a $V_t = 0$ et $V'_t = 0$ et par suite $M_t V'_t = M'_t V_t = 0$, de sorte que tous les termes, qui se rapportent à des conducteurs placés dans les

conditions de A_t, disparaissent des deux membres de l'équation de Gauss.

Si donc tous les conducteurs, à l'exception de A_r et A_s, restent au potentiel zéro dans les deux états d'équilibre considérés, il vient simplement

$$M_r V'_r + M_s V'_s = M'_r V_r + M'_s V_s.$$

D'ailleurs on a par hypothèse $V_s = V'_r = 0$; la proposition de Gauss se réduit donc dans le cas actuel à

$$M_s V'_s = M'_r V_r.$$

Or, ici

$$M_s = c_s^r V_r,$$

et

$$M'_r = c_r^s V'_s.$$

Donc

$$c_s^r V_r V'_s = c_r^s V_r V'_s,$$

ou

$$c_s^r = c_r^s,$$

ce qu'il fallait démontrer.

Ainsi, *dans un système de conducteurs fixes, le coefficient d'induction de* A_r *sur* A_s *est égal au coefficient d'induction de* A_s *sur* A_r.

Théorème III. — *Dans un système de n conducteurs, le potentiel de l'un quelconque de ces conducteurs est une fonction linéaire des charges de tous les autres.*

Il suffit, pour s'en convaincre, de résoudre les équations (1) par rapport aux potentiels; on obtient n autres équations linéaires de la forme

$$(2)\quad \begin{cases} V_1 = K_1^1 M_1 + K_1^2 M_2 + \ldots + K_1^r M_r + \ldots + K_1^n M_n, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ V_s = K_s^1 M_1 + K_s^2 M_2 + \ldots + K_s^r M_r + \ldots + K_s^n M_n, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ V_n = K_n^1 M_1 + K_n^2 M_2 + \ldots + K_n^r M_r + \ldots + K_n^n M_n. \end{cases}$$

La signification de ces n^2 nouveaux coefficients est évidente. K_r^r s'appelle le *coefficient de potentiel de* A_r *sur lui-même;* c'est le potentiel de A_r pour une charge unité, les autres conduc-

teurs étant à l'état neutre; K_s^r est le *coefficient de potentiel de* A_r *sur* A_s : c'est le potentiel de A_s dû à l'unité de charge sur A_r, dans les mêmes conditions du système.

Du reste, on peut établir directement les équations linéaires d'équilibre qui donnent les potentiels V en fonction des charges M. On démontrera aussi que

$$K_s^r = K_r^s,$$

c'est-à-dire que le coefficient de potentiel de A_r sur A_s est égal au coefficient de potentiel de A_s sur A_r. Pour cela, on appliquera la proposition de Gauss à deux états successifs où chacun des conducteurs A_r et A_s est seul chargé de l'unité de l'électricité, tous les autres étant à l'état neutre.

En résumé, *les coefficients de potentiel et d'induction de* A_r *sur* A_s *sont égaux aux coefficients de* A_s *sur* A_r.

3. Examinons quelques-unes des propriétés de ces coefficients.

1° *Les coefficients de potentiel sont tous positifs, mais aucun des coefficients* K_s^r *ne peut être plus grand que* K_r^r *ou* K_s^s.

Supposons A_r chargé de l'unité de quantité, les autres conducteurs étant à l'état neutre. Il se formera dans le champ une série de surfaces équipotentielles dont fera partie la surface de A_r : le potentiel à la surface de A_r sera K_r^r.

Si le conducteur A_s est à l'intérieur de A_r et complètement entouré par lui, le potentiel de A_s sera aussi égal à K_r^r. Si A_s est à l'extérieur de A_r, son potentiel K_s^r aura une valeur comprise entre K_r^r et zéro.

En effet, considérons les tubes de force émis dans l'espace environnant par le conducteur A_r. Sur un conducteur quelconque soumis à l'influence de A_r, la charge est numériquement égale à la différence entre le nombre de tubes qui émanent de la surface et le nombre de tubes qui y aboutissent; or, si le conducteur n'a pas de charge, comme c'est le cas du corps A_s primitivement à l'état neutre, ces deux nombres sont égaux. Mais les tubes absorbés par A_s viennent des régions du champ à potentiel plus élevé, et les tubes émis par A_s se rendent aux régions de moindre potentiel.

Donc le potentiel d'un corps sans charge doit être intermédiaire entre les potentiels maximum et minimum du champ.

Le potentiel maximum du champ est évidemment K_r^r, celui du seul corps chargé A_r d'où émanent originairement tous les tubes; le potentiel minimum est celui des portions de l'espace infiniment distantes; il est nul et par suite tous les autres potentiels, tels que K_s^r, des corps primitivement neutres et soumis à l'influence, sont compris entre K_r^r et o.

Si A_s enveloppe complètement A_t, on a $K_s^r = K_t^r$.

2° *Les coefficients de capacité sont toujours positifs; mais les coefficients d'induction sont toujours négatifs et la somme de ceux appartenant à un même conducteur ne peut être numériquement plus grande que le coefficient de capacité de ce conducteur.*

Dans le système $A_1, \ldots, A_r, A_s, \ldots, A_n$, supposons que A_r soit maintenu au potentiel 1, les autres conducteurs étant au potentiel zéro; la charge sur A_r est C_r^r, et la charge induite sur un autre conducteur, A_s par exemple, est C_s^r. Le nombre de tubes de force, émis par A_r, est C_r^r; parmi ces tubes, les uns viennent aboutir sur les autres conducteurs et s'y terminent, les autres se prolongent jusqu'à l'infini; mais aucun tube ne peut traverser un quelconque de ces conducteurs ni s'élancer de leurs surfaces jusqu'à l'infini, puisqu'ils sont tous au potentiel zéro. En particulier, aucun tube ne peut émaner du conducteur A_s puisqu'il n'y a dans le champ aucune région possédant un potentiel moindre que A_s. Donc, la charge de A_s, c'est-à-dire C_s^r, est *négative*.

Maintenant, si un des conducteurs, A_t par exemple, entoure complètement A_r, tous les tubes émis par A_r sont forcément absorbés par A_t et les conducteurs enfermés par l'enveloppe, et la somme des coefficients de A_r sur ces différents corps sera égale à $-C_r^r$. Mais si A_r n'est pas complètement enveloppé par un conducteur, il y a en général un certain nombre de tubes de force qui se prolongeront dans l'espace laissé entre les conducteurs jusqu'à l'infini, et qui ne produiront aucune induction efficace. Bien évidemment alors, la somme des coefficients d'induction, tels que C_s^r, sera moindre que la capacité C_r^r.

NOTE XI.

FORCE MÉCANIQUE RÉSULTANTE SUR UN CONDUCTEUR.

Considérons un système de n conducteurs électrisés; $n-1$ sont fixes et le dernier A_n est mobile. La force qui le sollicite est la résultante des actions électriques émanant de tous ces conducteurs. Soient ds un déplacement élémentaire du conducteur A_n, F la composante de la force dirigée suivant le déplacement. Qu'il y ait attraction ou répulsion, le conducteur mobile s'avance dans les régions du champ où le potentiel est moindre; car le point d'application de la résultante décrit une ligne de force dans le sens *positif*, c'est-à-dire dans le sens suivant lequel, comme on le sait, les potentiels diminuent. $F\,ds$ est le travail des forces pendant le déplacement ds.

Si ce travail est emprunté *uniquement* à l'électrisation du système, *sans qu'il y ait intervention d'énergie étrangère*, il est égal à la diminution d'énergie potentielle et l'on a, W étant l'énergie primitive,

$$F\,ds + dW = 0,$$

d'où

$$F = -\frac{dW}{ds}.$$

Pour former le coefficient différentiel $\frac{dW}{ds}$, il faut observer que les charges M_1, M_2, ..., sur les conducteurs restent constantes et que les potentiels seuls éprouvent une diminution.

Si les conducteurs, au lieu d'être isolés, sont reliés à une pile ou à toute autre source électrique, qui maintienne leurs potentiels constants durant le déplacement ds, le travail mécanique accompli pendant le déplacement spontané est égal à l'accroissement d'énergie du système, c'est-à-dire que

$$F\,ds = dW,$$

d'où

$$F = \frac{dW}{ds}.$$

En résumé, la force F est égale à $-\frac{dW}{ds}$ quand les charges des conducteurs restent constantes, et à $+\frac{dW}{ds}$ quand les potentiels sont constants.

NOTE XII.

SUR L'ÉLECTROMÈTRE A QUADRANTS DE THOMSON.

1. Nous appliquerons à cet électromètre plusieurs théorèmes généraux sur les systèmes de conducteurs, que nous supposons connus.

Appelons (*fig.* 243) A et B les paires de quadrants $[a, c]$, $[b, d]$ ou conducteurs fixes, et C l'aiguille ou conducteur mobile; V_1, V_2, V_3 les potentiels respectifs des trois conducteurs A, B, C; a, b, c leurs capacités électrostatiques; enfin p, q, r les coefficients d'induction entre B et C, C et A, A et B. Pour exprimer les charges M_1, M_2, M_3 de chaque conducteur en fonction des potentiels correspondants, on a les trois équations linéaires (Note X)

$$\begin{aligned} M_1 &= aV_1 + rV_2 + qV_3,\\ M_2 &= rV_1 + bV_2 + pV_3,\\ M_3 &= qV_1 + pV_2 + cV_3. \end{aligned}$$

L'énergie du système sera

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2}(M_1V_1 + M_2V_2 + M_3V_3)\\ &= \frac{1}{2}(aV_1^2 + bV_2^2 + cV_3^2 + 2pV_2V_3 + 2qV_3V_1 + 2rV_1V_2). \end{aligned}$$

Si θ désigne la déviation angulaire que l'aiguille subit de A vers B, le déplacement élémentaire du point d'application, pour une va-

riation d'angle $d\theta$, est $ds = l\,d\theta$, l étant la distance de ce point à l'axe de mouvement. La force électrique, qui tend à accroître θ, a pour expression

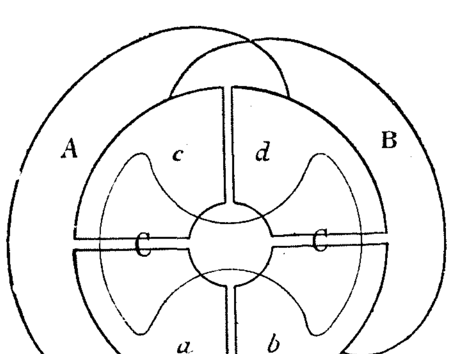
$$F = \frac{dW}{ds} = \frac{1}{l}\frac{dW}{d\theta},$$

et par suite le moment H de cette force est

$$(1) \qquad H = Fl = \frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{2}\left(V_1^2\frac{da}{d\theta} + V_2^2\frac{db}{d\theta} + V_3^2\frac{dc}{d\theta} + 2V_2V_3\frac{dp}{d\theta} + 2V_3V_1\frac{dq}{d\theta} + 2V_1V_2\frac{dr}{d\theta}\right).$$

Les potentiels V_1, V_2, V_3 sont maintenus constants : la variation

Fig. 243.



de l'énergie W ne dépend donc que de celle des coefficients d'induction. Or ces derniers varient avec la position de l'aiguille C; mais, si le mouvement de ce conducteur reste confiné dans des limites très peu étendues, on peut déterminer la forme de ces coefficients.

La portion de surface du quadrant A opposée à l'aiguille C diminue quand la rotation θ augmente; a et q sont les charges de A et C, lorsque A est maintenu au potentiel 1, les deux autres conducteurs B et C étant au potentiel zéro. Or le système [AC] est un condensateur formé de plaques parallèles et dont la capacité est

proportionnelle à l'étendue des surfaces opposées; si donc ces dernières diminuent, leurs charges contraires diminuent également de petites quantités égales, que l'on peut considérer comme proportionnelles à θ. On a par conséquent, dans l'état d'équilibre de l'aiguille correspondant à cette déviation,

$$a = a_0 - k\theta,$$
$$q = q_0 + k\theta,$$

où k est une constante, a_0 la capacité de A, et q_0 le coefficient d'induction de A sur C dans la position symétrique de l'aiguille.

Puisque A et B sont symétriques, la capacité de B est après la déviation

$$b = b_0 + k\theta,$$

et le coefficient de B sur C devient

$$p = p_0 - k\theta.$$

La capacité de C ne change pas dans le déplacement; car c'est, par définition, la charge que prend l'aiguille portée au potentiel 1 en dedans des secteurs qui l'enveloppent complètement et qui sont maintenus au potentiel zéro. Cette charge est constante, et le seul effet du déplacement de l'aiguille est d'amener une partie différente de la charge C en regard de l'intervalle compris entre A et B.

En outre, le coefficient d'induction de A sur B, c'est-à-dire r, n'est pas sensiblement altéré dans le déplacement de l'aiguille; par définition, r représente la charge induite sur B supposé au potentiel zéro, quand A est porté au potentiel 1 et quand l'aiguille C est maintenue au potentiel zéro. Assurément une petite rotation de l'aiguille, de A vers B, diminuant la surface de l'aiguille opposée à A, diminue la charge accumulée sur A pour le même potentiel; mais cette diminution de charge, qui s'accomplit avec la rotation en face des bords extrêmes de l'aiguille, ne peut pas affecter sensiblement la couche induite sur les secteurs B par le secteur A.

Substituant les valeurs de ces coefficients de capacité et d'induction, après la déviation θ, dans la formule (1), on a pour le

moment H

$$\text{(2)} \qquad H = \frac{1}{2}(-kV_1^2 + kV_2^2 - kV_2V_3 + kV_3V_1)$$
$$= -\frac{1}{2}k(V_1^2 - V_2^2) + kV_3(V_1 - V_2)$$
$$= k(V_1 - V_2)\left[V_3 - \frac{1}{2}(V_1 + V_2)\right].$$

Dans l'état d'équilibre, le moment H de la résultante des forces électriques est égal au moment de torsion ou de réaction de la suspension simple ou bifilaire. Or le moment de ce dernier couple est proportionnel à l'écart θ de l'aiguille, quand les déviations sont très faibles; c'est ce qui a toujours lieu dans la pratique. En désignant par h le moment du couple de réaction des fils suspenseurs pour une déviation égale à 1, on a l'égalité

$$h\theta = k(V_1 - V_2)\left[V_3 - \frac{1}{2}(V_1 + V_2)\right],$$

d'où

$$\theta = K(V_1 - V_2)\left[V_3 - \frac{1}{2}(V_1 + V_2)\right],$$

en posant $\frac{k}{h} = K$.

2. **Discussion de cette formule d'équilibre.** — 1° Si les potentiels V_1 et V_2 des corps A et B sont égaux et de signes contraires, c'est-à-dire si l'on a $V_1 = -V_2$, la formule (2) se réduit à

$$\text{(3)} \qquad H = 2kV_1V_3.$$

Le moment de la force est donc proportionnel au potentiel de l'aiguille et à la différence des potentiels des deux paires de quadrants.

On voit que l'appareil est éminemment propre à déterminer *la force électromotrice* d'une pile; car celle-ci se traduit, quand la pile est isolée, par des potentiels égaux et de signes contraires aux deux pôles.

Inversement, on pourra déterminer un potentiel très faible V_3 en fonction d'une différence $2V_1$ de deux autres potentiels égaux en valeur absolue et de signes contraires.

2° Si le potentiel de l'aiguille V_3 est très grand par rapport aux potentiels quelconques V_1 et V_2, la formule (2), qui peut s'écrire

$$(4) \qquad H = kV_3(V_1 - V_2)\left(1 - \frac{1}{2}\,\frac{V_1 + V_2}{V_3}\right),$$

devient

$$H = kV_3(V_1 - V_2);$$

car le facteur $1 - \frac{1}{2}\frac{V_1 + V_2}{V_3}$ ne diffère pas sensiblement de l'unité.

Mais si V_3 avait une valeur relativement faible par rapport à V_1 et V_2, ce même facteur deviendrait prédominant, condition expérimentale qui ne fournirait aucun résultat susceptible d'être immédiatement interprété.

3° Il y a lieu de remarquer que H, et par suite la déviation θ, s'annulent pour $V_1 = V_2$ et pour $V_1 - V_3 = V_3 - V_2$, c'est-à-dire pour des écarts égaux des potentiels des quadrants par rapport au potentiel de l'aiguille; notre formule générale l'indique, et cela devait être par simple raison de symétrie.

3. L'électromètre à quadrants sert :

1° A déterminer la force électromotrice des piles, en mettant les deux pôles d'une pile isolée en communication avec les conducteurs fixes A et B, et attribuant à C un potentiel constant V_3.

2° A déterminer la différence quelconque de deux potentiels V_1 et V_2 en fonction d'un potentiel constant et très grand, attribué à l'aiguille.

Dans les deux cas, en augmentant le potentiel du conducteur mobile C, on augmentera la sensibilité de l'instrument; car la déviation pourra être multipliée par un facteur très grand. Si en même temps les valeurs de la somme $\frac{1}{2}(V_1 + V_2)$ sont faibles, les déviations observées seront simplement proportionnelles au produit

$$V_3(V_1 - V_2).$$

C'est ce que montre la formule (4), et le mérite principal de l'électromètre à quadrants de Thomson résulte de cette propriété.

NOTE XIII.

ÉLECTROMÈTRE ABSOLU DE THOMSON.

1. Si deux plateaux conducteurs parallèles, situés à une très petite distance l'un de l'autre par rapport à l'étendue de leur surface, sont portés à des potentiels différents, il se produira sur les deux surfaces voisines des couches égales d'électricités contraires, et la densité de chaque couche sera constante, du moins en tous les points qui ne sont pas très rapprochés des bords. Sur les faces externes des plateaux il n'y aura qu'une faible charge, si l'on a soin d'éviter la présence de tout autre conducteur ou corps électrisé dans le voisinage. Dans ce cas l'attraction totale F, qui s'exerce entre les deux plateaux, a pour valeur

$$F = \frac{S}{8\pi}\left(\frac{V - V'}{D}\right)^2,$$

V et V′ étant les potentiels des deux plaques, D leur distance et S l'étendue de chacune des surfaces attirées. On voit qu'en prenant des disques très larges et maintenant entre eux une très petite distance, la plus légère différence de potentiel pourra donner naissance à une force d'attraction mesurable.

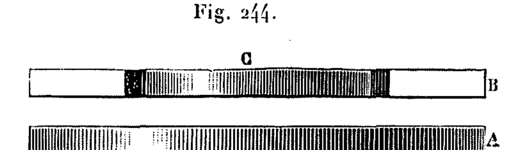
Si l'on parvient à mesurer F en unités absolues de force, on en déduira la valeur absolue de la différence des potentiels $V - V$:

$$V - V' = D\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}.$$

Mais la mesure de cette force, pour être précise, exige des dispositions particulières.

2. **Anneau de garde.** — Un perfectionnement considérable a été apporté par sir William Thomson à ce genre d'appareils. Il a eu l'idée ingénieuse de ne considérer que l'action de l'une des plaques sur la partie centrale de l'autre, pour laquelle la densité peut être regardée comme uniforme. A cet effet, il a découpé (*fig.* 244) dans le plateau supérieur B un petit disque central C, qui est seul mobile, tout en restant constamment en communication avec la partie annulaire B de la plaque qui l'entoure. Le disque C est ajusté

Fig. 244.



sans frottement dans la couronne fixe B et peut former avec elle un plan conducteur continu.

Le rôle pratique de cet anneau est de prolonger en quelque sorte le disque attiré; de cette façon nous nous procurons un disque suspendu où tout est partie centrale; il n'y a plus de bords, et par conséquent la densité électrique est maintenue uniforme sur toute l'étendue de la surface. En raison de cette fonction, Thomson a donné à la partie annulaire B le nom d'*anneau de garde*. Si l'on a soin de relier l'anneau de garde avec une cage métallique, qui entoure la face externe du disque attiré, ainsi que toutes les pièces de sa suspension, l'électrisation de cette face est rendue impossible; car elle forme une portion de la surface intérieure d'un conducteur creux, complètement fermé et porté tout entier à un potentiel constant et uniforme.

La même précaution peut être prise à l'égard de la face externe du disque inférieur A.

Si le disque C est un cercle de rayon R, la surface S est égale à πR^2. On peut tenir compte de l'intervalle annulaire qui existe entre le disque et l'anneau de garde [1], en prenant pour la surface S la moyenne entre la surface πR^2 et celle du cercle intérieur

(1) *Voir* Clerk Maxwell, *Electricity and Magnetisme*, t. I, p. 307.

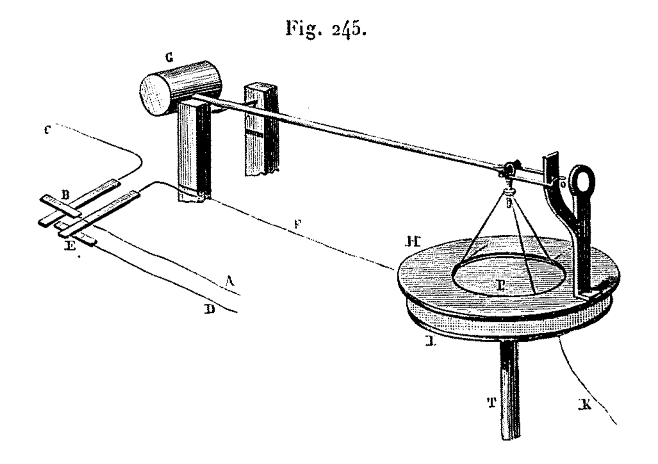
de l'anneau de garde $\pi R'^2$, c'est-à-dire la quantité $S = \pi\left(\frac{R^2+R'^2}{2}\right)$. L'équation précédente devient alors

$$(1) \qquad V - V' = 4D\sqrt{\frac{F}{R^2+R'^2}}.$$

On voit sur la *fig.* 245 les principales dispositions de l'instrument primitivement employé par Thomson.

P représente le disque mobile; il est suspendu, par trois fils de métal, à un levier de métal qui peut tourner autour d'un axe hori-

Fig. 245.



zontal soutenu par deux supports conducteurs. Le disque est équilibré par un contre-poids G et forme avec lui une petite balance. Le plateau inférieur qui produit l'attraction est porté par un support isolant : on peut l'élever ou l'abaisser d'une quantité connue à l'aide d'une vis micrométrique qui permet d'apprécier les plus petits déplacements. L'anneau de garde et le disque mobile sont en communication l'un avec l'autre par le fil conducteur F, les montants, le levier et les fils de suspension.

La balance est dans sa position d'équilibre lorsque le plan du disque mobile est exactement dans le plan de l'anneau de garde.

Cette position est indiquée par un cheveu très fin, tendu horizontalement entre les deux bras d'une fourchette *o* qui termine

l'extrémité du levier du côté du disque suspendu. Ce cheveu oscille devant une plaque blanche que la fourchette laisse passer, et sur laquelle sont marqués deux points noirs très voisins : ces points sont observés avec une petite loupe. L'appareil est réglé de telle sorte que le cheveu se projette exactement entre les deux repères orsque la balance est dans sa position d'équilibre.

3. Pour se servir de cet appareil, on rend d'abord la balance complètement neutre dans toutes ses parties; puis on place un petit poids connu p sur le disque mobile et, à l'aide d'un cavalier que l'on fait glisser sur le levier, on règle le contre-poids de manière à établir l'équilibre de la balance.

Supposons que l'on ait à déterminer le potentiel absolu V d'une source électrique donnée.

On met en communication avec la terre l'anneau de garde et le plateau mobile, puis on relie avec la plaque inférieure A de la *fig.* 244 la source dont on veut mesurer le potentiel. On enlève alors le poids additionnel déposé sur le disque, et l'on soulève ou l'on abaisse la plaque A à l'aide de la vis micrométrique jusqu'à ce que le cheveu revienne au repère. Quand le disque mobile a repris sa position dans le plan de l'anneau de garde, on est sûr que l'attraction entre les disques est égale au poids additionnel p. Le poids p, exprimé en grammes, représente une force absolue (C.G.S) égale à pg, g étant l'intensité de la pesanteur au lieu de l'observation (¹). On a donc, d'après la formule (1), et puisque $V' = 0$,

$$V = 4D\sqrt{\frac{pg}{R^2 + R'^2}}. \qquad (2)$$

Telle est la valeur absolue (C.G.S) du potentiel V, qui dépend de la mesure absolue de la distance D des deux plateaux.

4. Pour déterminer D, il suffit de faire mouvoir la vis micrométrique jusqu'à ce que le plateau inférieur A vienne au contact de l'anneau de garde. Or cette lecture du micromètre, correspondant à $D = 0$, présente toujours quelque incertitude; dans la mesure des faibles potentiels, pour lesquels la distance D est très petite,

(¹) Rappelons qu'à Paris, g est égal à 981,17 dynes.

le moindre défaut dans l'ajustement du disque suspendu pourrait surtout entraîner une erreur considérable.

Thomson a donné le moyen de remédier à cette cause d'erreur. Il effectue la mesure des potentiels V_1, V_2, V_3, ... des diverses sources A_1, A_2, A_3, ..., au moyen d'un potentiel auxiliaire, maintenu à une valeur constante V. Ce potentiel auxiliaire peut-être fourni soit par une bouteille de Leyde, soit par une pile. L'opération est conduite de la manière suivante :

On met d'abord la plaque inférieure A en communication avec l'armature intérieure de la bouteille de Leyde, dont l'armature extérieure communique avec le sol; on relie aussi à la terre l'anneau de garde et le disque mobile C; puis on enlève le poids additionnel p. L'équilibre de la balance est rompu; on fait tourner la vis micrométrique jusqu'à ce qu'il soit rétabli. Si D est la distance des deux plateaux, le potentiel de la bouteille de Leyde sera donné par la formule

$$V = 4D\sqrt{\frac{pg}{R^2 + R'^2}}.$$

On fait ensuite communiquer le plateau C avec la source A_1 au potentiel inconnu V_1. L'équilibre est de nouveau rompu; on tourne la vis micrométrique jusqu'à ce que le disque C se place de lui-même dans le plan de l'anneau de garde. Mais la vis ayant tourné de la quantité d_1, que l'on connaît avec grande exactitude, la distance des deux plateaux est devenue $(D \pm d_1)$. Supposons que le potentiel auxiliaire V soit positif : si le potentiel de A_1 est aussi positif, l'induction est moindre entre les deux plateaux, et il faut rapprocher le plateau inférieur A de l'anneau de garde pour rétablir l'équilibre : d_1 est négatif. Le contraire se présente lorsque A_1 a un potentiel négatif; dans ce cas, il faut accroître l'écartement des plateaux et d_1 est positif.

Dans les deux expériences exécutées successivement, l'attraction du plateau fait équilibre au même poids p; on a donc, d'après la formule (1),

$$V - V_1 = 4(D \pm d_1)\sqrt{\frac{pg}{R^2 + R'^2}}.$$

En retranchant membre à membre ces deux équations, il vient

$$V_1 = \mp 4 d_1 \sqrt{\frac{pg}{R^2 + R'^2}}.$$

Ainsi le potentiel V_1 de la source A_1 s'obtient en mesurant le déplacement d_1 du plateau, c'est-à-dire la différence des *lectures* de la vis micrométrique, différence qui peut être appréciée avec une exactitude parfaite, sans que l'on connaisse *effectivement* les distances.

NOTE XIV.

SUR L'ÉLECTROMÈTRE PORTATIF DE THOMSON.

1. Dans la description de l'instrument, il est souvent fait allusion à la *répulsion* de deux plateaux chargés à des potentiels différents. Or, dans tous les autres traités d'électricité, on énonce que le phénomène d'attraction est le seul qui se manifeste. C'est là une contradiction que cette Note a pour but de faire disparaître.

Rappelons d'abord quelques propositions connues.

I. Si deux conducteurs A et B renferment les charges M_1 et M_2 sous les potentiels respectifs V_1 et V_2, on a entre ces quantités les deux équations linéaires suivantes :

$$(1) \qquad \begin{cases} M_1 = C_1^1 V_1 + C_1^2 V_2 \\ M_2 = C_2^1 V_1 + C_2^2 V_2. \end{cases}$$

Dans ces équations, C_2^1 à la même valeur que C_1^2; C_2^2 et C_1^1 sont toujours plus grands en valeur absolue que C_2^1 ou C_1^2; les coefficients d'induction C_2^1, C_1^2 sont négatifs et les capacités C_2^2, C_1^1 sont positives.

Posons $C_2^1 = -C$; nous pourrons écrire

$$C_1^1 = C + C_1 \quad \text{et} \quad C_2^2 = C + C_2$$

C, C_1 et C_2 étant des quantités positives.

En substituant dans les relations (1), on trouve

$$M_1 = C(V_1 - V_2) + C_1 V_1$$
$$M_2 = -C(V_1 - V_2) + C_2 V_2.$$

Dans ces deux dernières équations, les charges réciproquement induites entre les deux conducteurs, charges égales et contraires, ont pour valeur absolue

$$C(V_1 - V_2),$$

et les charges libres sont respectivement C_1V_1 sur A, et C_2V_2 sur B.

II. L'expression de l'énergie électrique du système des deux conducteurs A et B est alors

$$W = \frac{1}{2}C_1V_1^2 + \frac{1}{2}C_2V_2^2 + \frac{1}{2}C(V_1 - V_2)^2,$$

expression où les deux premiers termes du second membre représentent l'énergie de la charge libre, et où le troisième désigne l'énergie de la charge induite sur les deux conducteurs.

III. Pour trouver la force qui s'exerce entre les couches distribuées sur les conducteurs A et B, cherchons le travail dépensé dans le déplacement infiniment petit de l'un d'eux par rapport à l'autre. Si nous supposons les deux corps maintenus à des potentiels fixes V_1, V_2, les trois capacités C, C_1, C_2 seront modifiées, pendant la durée d'un mouvement quelconque, des quantités infiniment petites dC, dC_1, dC_2. Par suite le travail dépensé en transportant le premier conducteur de A en A_1 sur une longueur élémentaire dx, c'est-à-dire d'une position où les trois capacités sont C, C_1, C_2, dans une autre position où elles deviennent, $C + dC$, $C_1 + dC_1$, $C_2 + dC_2$, aura pour expression

$$F\,dx = \frac{1}{2}(dC)(V_1 - V_2^2)^2 + \frac{1}{2}(dC_1)V_1^2 + \frac{1}{2}(dC_2)V_2^2,$$

F étant la force électrique contre laquelle le mouvement est accompli dans la direction dx.

2. Considérons, pour revenir à l'objet de cette Note, deux plateaux A et B (*fig.* 246) tenus, parallèlement l'un à l'autre, à la distance x et portés respectivement aux potentiels V_1 et V_2. En négligeant la portion de chaque plateau qui avoisine les bords, on voit qu'il y a deux systèmes électriques à considérer, les surfaces extérieures S_1' et S_2' de A et de B, qui sont librement élec-

trisées, et les surfaces intérieures S_1 et S_2 de A et de B qui agissent l'une sur l'autre. Les surfaces S'_1 et S'_2 sont protégées contre leurs actions réciproques par la substance des plateaux conducteurs.

Si nous appelons C_1 la capacité des charges sur S'_1 et S'_2, et C la capacité du condensateur formé par les plateaux, la force qui tend

Fig. 246.

à effectuer la séparation de ces plateaux pour un accroissement de distance égal à dx, sera

$$F = \frac{1}{2}\frac{dC}{dx}(V_1 - V_2)^2 + \frac{1}{2}\frac{dC_1}{dx}(V_1^2 + V_2^2).$$

Or, on sait que la capacité d'un condensateur de cette forme est

$$C = \frac{S}{4\pi x},$$

S étant la surface de chaque plateau; en prenant les dérivées des deux membres, on a

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{S}{4\pi x^2}.$$

Nous ne connaissons pas la valeur de C_1; mais il est certain qu'elle

augmente avec la distance x. La force qui agit entre les plateaux à la distance x a donc pour expression

$$F = -\frac{S}{8\pi x^2}(V_1 - V_2)^2 + \frac{1}{2}\frac{dC_1}{dx}(V_1^2 + V_2^2).$$

Cette expression nous apprend que, si $V_1 - V_2$ est différent de zéro, la force est attractive quand les plateaux sont suffisamment rapprochés. De plus, on peut rendre le premier terme aussi petit que l'on voudra en augmentant la distance x; la force deviendra alors répulsive.

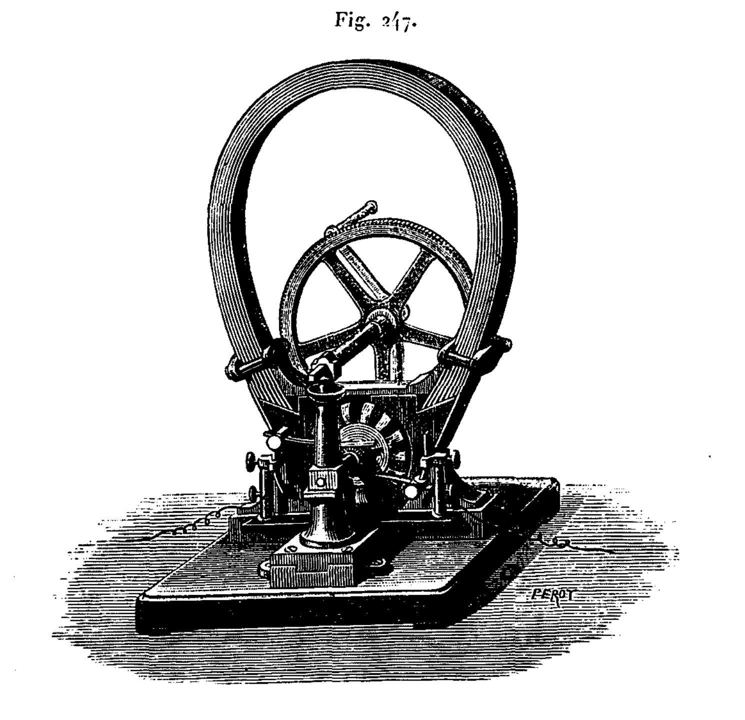
De là, on conclut qu'en approchant les plateaux très près l'un de l'autre, il y aura toujours attraction entre eux et qu'en les écartant à une distance suffisante il se produira une répulsion.

NOTE XV.

MACHINE GRAMME.

1. Au nombre des machines magnéto-électriques ou plutôt

Fig. 247.

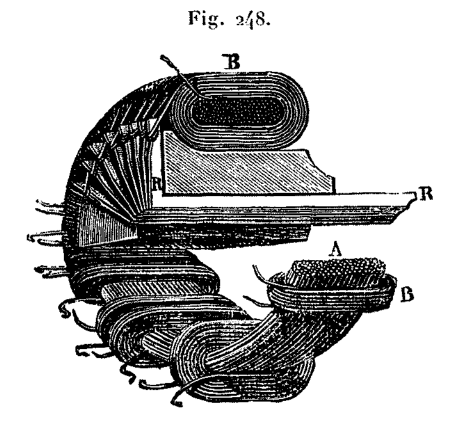


dynamo-électriques les plus répandues figure la machine Gramme.

qui fournit des courants continus sans qu'il soit nécessaire de redresser ces courants à l'aide d'aucun commutateur spécial; nous empruntons à M. Jamin la description et la théorie de cette machine, qui n'est d'ailleurs qu'une modification de celle de M. Pacinotti, inventée dès 1861, et restée longtemps ignorée et du public et de M. Gramme lui-même, dont la découverte date de 1870.

Entre les pôles d'un fort aimant en fer à cheval tourne d'un mouvement rapide un anneau de fils de fer doux (*fig.* 247), mobile

Fig. 248.



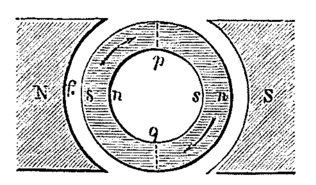
autour d'un axe perpendiculaire au plan de l'aimant, de telle sorte que cet anneau tourne sur lui-même et occupe dans l'espace une position invariable. Autour de cet anneau, dont la coupe est représentée à part (*fig.* 248), est enroulé un fil formant un nombre plus ou moins grand de petites bobines B réunies en un circuit unique fermé sur lui-même. Toutefois, au point de jonction de chaque bobine avec la suivante, se trouve soudée une tige conductrice R, dirigée suivant un rayon de l'anneau et se recourbant à angle droit sur l'axe d'ébonite autour duquel s'opère la rotation. Cet axe se trouve donc environné de tiges conductrices isolées les unes des autres et correspondant chacune à l'un des points de soudure. Deux frotteurs ou balais métalliques s'appuient sur l'axe, à 90° des pôles de l'aimant, et sont toujours en contact avec un couple de tiges R correspondant aux extrémités du diamètre vertical de

l'anneau. Les balais sont en communication avec les bornes auxquelles s'attachent les fils du circuit extérieur.

Pour démontrer que le circuit de cet appareil est parcouru par un courant de direction invariable, il suffit de prouver qu'un courant doit se produire; car la position, par rapport aux balais, du système magnétique formé par l'aimant et l'anneau est la même après une fraction quelconque de tour exécutée par l'anneau, et il n'y a par conséquent aucune raison pour que le courant change de sens.

L'anneau de fer doux, placé entre les deux pôles de l'aimant NS, est aimanté transversalement par influence et présente extérieurement un large pôle boréal s au pôle austral N de l'aimant, un

Fig. 249.

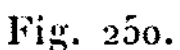


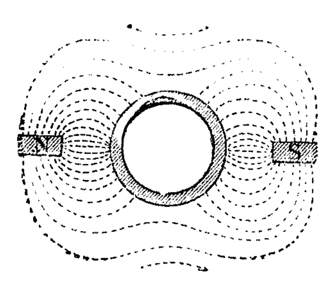
large pôle austral n au pôle boréal S. La force magnétique résultante est très grande à l'extérieur de l'anneau, parce que les actions de l'aimant et du fer doux sont concordantes, et très faible à l'intérieur de l'anneau, parce que ces actions se retranchent. On a représenté (*fig.* 250) le champ magnétique correspondant à ce système; suivant la méthode de Faraday, les lignes de force tracées en lignes pointillées sont d'autant plus serrées les unes contre les autres que la force magnétique aux points correspondants est plus considérable. On n'a figuré aucune de ces lignes à l'intérieur de l'anneau où la force magnétique est négligeable.

Considérons un fil vertical f qui se déplace dans le champ parallèlement à la flèche. Ce fil, placé dans la région Ns où la force magnétique est considérable, est soumis à une force électromotrice d'induction tendant d'après la loi de Lenz à gêner son mouvement, et par conséquent dirigée de bas en haut, de telle sorte qu'un observateur placé sur le fil suivant la règle d'Ampère aurait le pôle

austral N à sa gauche. Au lieu de se prolonger indéfiniment en ligne droite, le fil f peut se recourber en spire autour de l'anneau; sa branche descendante, intérieure à l'anneau, se trouve dans une région du champ où la force magnétique et par suite la force électromotrice d'induction sont négligeables, et les forces électromotrices développées sur la partie extérieure de chaque spire, à gauche de la ligne moyenne pq du champ, sont toutes de même signe et s'ajoutent. Leur intensité est maximum sur le diamètre NS et décroît jusqu'aux points p et q où elle est nulle.

Le même raisonnement établit que la moitié de droite pSq du


Fig. 250.



champ fournit des forces électromotrices égales en grandeur et contraires en signes à celles qui règnent aux points correspondants de la moitié gauche pNq. Elles produiraient, si elles agissaient seules, un courant descendant dans les branches extérieures des spires, ascendant dans les branches intérieures. Si le fil *entourant* l'anneau était simplement fermé sur lui-même, les deux systèmes de forces électromotrices produites dans les deux moitiés du champ se détruiraient réciproquement, et le fil ne serait animé par aucun courant. Ce cas est comparable à celui de deux piles P et P', opposées par leurs pôles de même nom sur un circuit fermé $PpP'q$ (*fig.* 251).

Mais, si, dans le cas de cette double pile, on greffe aux deux points p et q des fils de jonction qui donnent lieu au circuit auxiliaire pGq, les choses se passent d'une tout autre manière. Par rapport à ce circuit, les deux piles P et P' se trouvent réunies en quantité et produiront un courant énergique. De même dans le

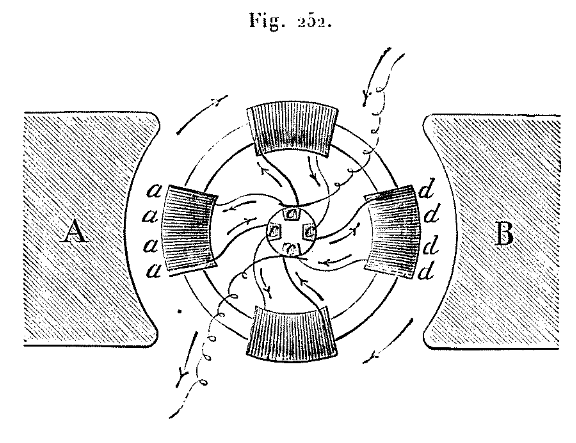
cas de la machine Gramme, les forces électromotrices inverses (*fig.* 252), produites dans les deux moitiés du champ concordent pour produire un courant qui traverse dans le sens indiqué par

Fig. 251.

les flèches le circuit extérieur greffé sur l'anneau par l'intermédiaire des frotteurs.

Dans la théorie qui précède, nous avons fait abstraction du mouvement de l'anneau. Or, quand celui-ci tourne avec rapidité,

Fig. 252.



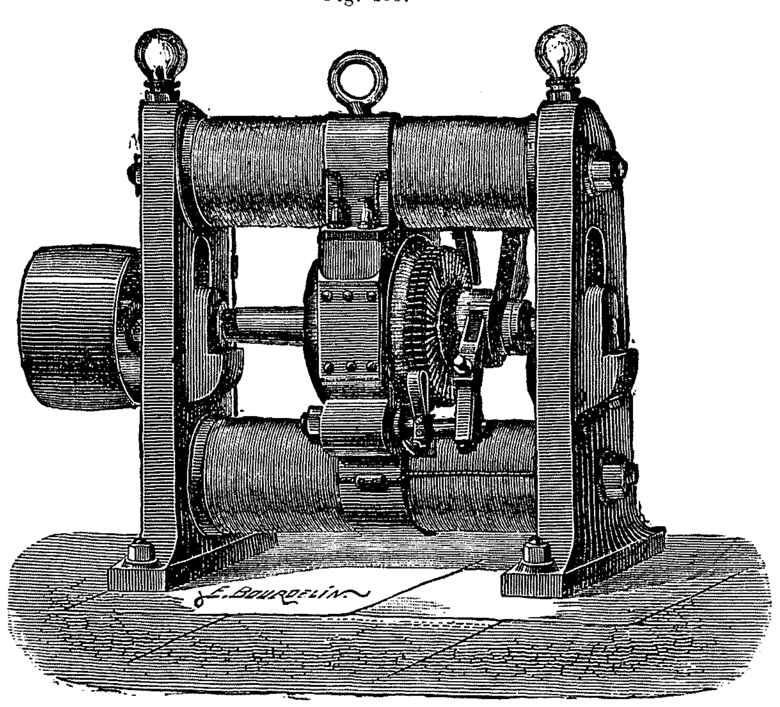
un point matériel P pris dans l'anneau ne possède pas rigoureusement toute la quantité de magnétisme qu'il aurait au point P_1 de l'espace occupé par lui, si l'anneau était en repos; car l'aimantation n'est pas un phénomène absolument instantané. Il en résulte une perturbation du jeu de la machine, qui se traduit pratiquement par un défaut de symétrie du champ relativement à la ligne *pq*. Pour obtenir de la machine Gramme le maximum d'effet, on est obligé

de déplacer d'un certain angle, dans le sens de la rotation, le diamètre des balais par rapport à sa position normale *pq*. Le retard de l'aimantation n'est d'ailleurs pas la seule cause qui agisse pour produire cet effet.

La machine Gramme représentée (*fig.* 247) est mue à la main; l'effort moyen d'un homme, appliqué à cet appareil, produit dans le circuit extérieur des effets électriques équivalents à ceux que produiraient 8 éléments Bunsen.

2. Pour obtenir des effets plus puissants et rendre la machine

Fig. 253.



Gramme susceptible d'applications industrielles, son inventeur a substitué à l'aimant fixe un système d'électro-aimants alimenté par le courant de la machine elle-même, comme cela a lieu dans la machine de Wilde. (C'est ce qui a fait donner à ces machines le

nom de machines dynamo-électriques.) La *fig.* 253 représente l'appareil ainsi modifié. Les deux bobines de droite (supérieure et inférieure) forment un premier électro-aimant en fer à cheval; les bobines de gauche un deuxième électro-aimant. Deux larges plaques polaires de fer doux sont l'une (supérieure) la réunion des pôles nord, l'autre (inférieure) la réunion des pôles sud des deux électro-aimants. L'anneau, construit à la manière ordinaire, tourne entre ces plaques et reçoit son mouvement par une poulie portée par l'axe de l'anneau.

Suivant que la machine Gramme est destinée à la galvanoplastie ou à la production de la lumière électrique, sa construction se modifie; car il est nécessaire de proportionner la résistance extérieure des fils de l'anneau et des électro-aimants à la résistance du circuit extérieur, laquelle est faible dans le premier cas et considérable dans le second. Une machine à galvanoplastie, marchant à 500 tours par minute, précipite 600^{gr} d'argent par heure en consommant environ $\frac{2}{3}$ de cheval-vapeur. Une machine à lumière peut entretenir un nombre de brûleurs électriques plus ou moins grand, suivant le système auquel ils appartiennent, en consommant d'ailleurs une quantité de travail beaucoup plus considérable que la précédente. Ajoutons que, pour produire la lumière électrique, M. Gramme préfère aujourd'hui employer des machines à courants alternatifs, dont les bobines mobiles et les bobines fixes sont isolées les unes des autres. Les bobines fixes reçoivent le courant qui les traverse d'une machine Gramme extérieure à courants directs, qu'on appelle l'*excitatrice;* cette dernière est mise en mouvement par la même machine à vapeur que la machine à courants alternatifs qu'elle alimente.

NOTE XVI.

SUR LA TRANSMISSION DE LA FORCE.

1. Au nombre des essais tentés dans ces dernières années, il faut citer ceux qui ont eu pour but de transporter *électriquement* la force motrice à des distances trop considérables pour qu'on puisse recourir utilement à l'emploi des engins purement mécaniques de transmission, tels que arbres de couche, courroies sans fin, etc. Théoriquement le problème du transport de la force à distance se résout en plaçant dans un même circuit une machine dynamo-électrique, une machine Gramme par exemple, mise en jeu à l'une des stations A par la force motrice à utiliser, et un moteur électrique placé à la station B où l'on veut dépenser le travail. Tant que la distance AB n'est pas trop grande, on pourra relier les deux stations par des fils conducteurs de gros diamètres; ceux-ci n'absorberont, en vertu de leur résistance, qu'une quantité de chaleur, c'est-à-dire de travail, peu considérable. Mais il n'en est pas de même du travail correspondant à l'échauffement des deux machines; il consomme en pure perte une partie notable du travail local. On commettrait donc une erreur singulière en considérant le transport électrique de la force comme à peu près gratuit, même dans le cas des très petites distances où les transmissions mécaniques sont communément employées.

Le moteur électrique que nous supposons en B peut être une machine dynamo-électrique identique à celle qui emmagasine la

force en A. Ces machines sont en effet *réversibles,* c'est-à-dire qu'il suffit d'animer leur circuit par un courant identique à celui qu'elles produisent quand on les fait tourner dans un sens déterminé, pour que leur partie mobile se mette aussitôt à tourner en *sens inverse.* En d'autres termes, l'existence d'un courant dans le circuit de ces machines et le déplacement relatif de leur partie mobile par rapport à leur partie fixe sont des phénomènes connexes; l'un d'eux ne peut se produire sans donner naissance à l'autre; si l'on fournit du mouvement, on obtient de l'électricité; si l'on fournit de l'électricité, on recueille du mouvement. Quand deux machines identiques sont associées, le mouvement de l'une entraîne le mouvement de l'autre; le courant électrique traversant le fil qui les relie remplace les organes d'une transmission purement mécanique.

La première machine s'appelle *Machine génératrice,* la seconde *Machine motrice* ou *réceptrice.*

Le téléphone Graham Bell est une remarquable application du principe de la réversibilité des machines magnéto-électriques, énoncé pour la première fois en 1861 par M. Pacinotti, puis en 1867 par MM. Siemens frères.

Les anciennes machines à aimantation (comme le moteur Froment, décrit dans cet Ouvrage) présentaient, en tant que moteurs, plusieurs défauts : 1° affaiblissement de l'action magnétique avec la distance; 2° discontinuité des actions produisant le mouvement; 3° perte de temps nécessitée par l'aimantation et la désaimantation du fer, lesquelles ne s'exécutent pas instantanément, et enfin perte de travail utile provenant de l'échauffement des noyaux des électro-aimants sous l'influence d'aimantations et de désaimantations rapidement alternées.

Avec les machines dynamo-électriques, ces défauts disparaissent : 1° les différences d'action sont réduites au minimum; 2° les actions produisant le mouvement se succèdent assez rapidement pour qu'on puisse admettre qu'il y a continuité; 3° l'aimant inducteur restes toujours dans le même état, son noyau ne s'échauffant point.

2. Cherchons de quelle manière deux machines accouplées comme il vient d'être dit doivent être construites pour le transport

de la force à distance, dans les meilleures conditions possibles.

Nous supposerons que nos deux machines soient parfaites et parfaitement identiques. Soient E la force électromotrice de la machine génératrice, R la résistance du circuit, I l'intensité du courant qui le traverse, T_u l'énergie que peut rendre la machine motrice. La quantité totale d'énergie absorbée par la machine génératrice et contenue dans le circuit est EI; d'autre part l'échauffement des fils conducteurs, y compris ceux des deux machines, absorbe, d'après les lois de Joule, une quantité d'énergie égale à RI^2. On a donc (en négligeant les trépidations, les frottements et généralement toutes les causes de pertes)

$$EI = RI^2 + T_u,$$

d'où

$$T_u = EI - RI^2.$$

Pour que l'énergie rendue soit maximum, il faut que la perte RI^2 soit minimum. Or on ne peut réduire R à cause du prix énorme des fils métalliques de gros diamètre. Il faut donc réduire I. En même temps et pour ne pas diminuer l'énergie absorbée par la génératrice, il sera nécessaire d'augmenter en proportion la valeur de E. On voit que pour réaliser avantageusement le transport de la force, il faut employer des courants *à haut potentiel et de faible intensité*. Cette loi a été énoncée pour la première fois par M. Marcel Deprez : dans ses expériences sur le transport de la force entre Miesbach et Munich, la force électromotrice du courant envoyé dans le circuit par la machine génératrice, installée à Miesbach, était de 1400 volts, et son intensité d'environ $\frac{1}{2}$ ampère : la ligne proprement dite avait une longueur de 57^{km}, et présentait une résistance totale de 950 ohms.

La machine motrice, tournant en sens inverse de la machine génératrice, doit produire dans le circuit un contre-courant. C'est ce que démontre l'expérience : si les deux machines, supposées parfaitement identiques, sont réunies directement par un conducteur de faible résistance, et si la machine motrice n'effectue aucun travail utile, on constate qu'un galvanomètre placé dans le circuit reste au zéro, ce qui prouve que la motrice envoie dans le circuit un courant de même intensité que la génératrice, mais de

sens contraire. Si l'on donne à la machine motrice un travail à effectuer, et qu'on fasse croître peu à peu la valeur de ce travail, on constate que la vitesse de rotation diminue et que le galvanomètre dévie de plus en plus, ce qui prouve que le circuit est maintenant traversé par un courant d'intensité croissante. Soient E la force électromotrice du courant produit par la machine génératrice, e la force électromotrice de signe contraire du courant produit par la machine motrice, I l'intensité du courant qui parcourt le circuit dans lequel les deux machines sont intercalées : la loi d'Ohm donne

$$I = \frac{E - e}{R},$$

d'où

$$RI = E - e \quad \text{et} \quad E = RI + e;$$

on a donc

$$EI = RI^2 + eI,$$

et, par suite,

$$T_u = eI.$$

Le *rendement c*, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie restituée et l'énergie absorbée, est donc

$$c = \frac{eI}{EI} = \frac{e}{E}.$$

Si v et V sont les vitesses de rotation des anneaux, on sait que $\frac{e}{E} = \frac{v}{V}$. On peut donc encore écrire :

$$c = \frac{v}{V}.$$

Ainsi le rendement est égal au rapport de la force électromotrice de la motrice à la force électromotrice de la génératrice; il est indépendant de la résistance du circuit, et par conséquent de la distance : cette loi importante est due à M. Marcel Deprez.

Dans ses expériences, la force électromotrice du contre-courant envoyé dans le circuit par la machine motrice installée à Munich avait une valeur de 640 volts : le rendement était donc $\frac{640}{1400} = 0,46$, valeur à peu près égale au rapport $\frac{740}{1600}$ des nombres de tours que

faisaient à la minute la motrice et la génératrice. Le travail transmis était de $18^{kgm},5$ à la seconde.

En résumé, la quantité totale d'énergie absorbée par la machine génératrice est

$$T = EI = \frac{E(E-e)}{R};$$

le travail utile produit est

$$T_u = eI = \frac{e(E-e)}{R},$$

et le travail perdu est

$$T_r = RI^2 = \frac{(E-e)^2}{R}.$$

En divisant ces trois résultats par g, c'est-à-dire par 9,8, on aura les valeurs de T, T_u, T_r en kilogrammètres à la seconde.

Remarque. — Remplaçons, dans les formules précédentes, e par cE : on a

$$T = \frac{E^2}{R}(1-c)$$

$$T_u = \frac{E^2}{R}c(1-c)$$

$$T_r = \frac{E^2}{R}(1-c)^2.$$

Pour une force électromotrice et une résistance du circuit déterminées, le travail utile rendu par la génératrice ne change donc pas quand c se change en $1-c$; en d'autres termes, pour deux valeurs complémentaires du rendement, le travail utile obtenu est le même. Ainsi le *rendement* ne correspond pas au *travail utile obtenu,* puisque ce dernier peut être le même pour deux valeurs très différentes du rendement.

Pour maintenir constant le travail utile obtenu, lorsque la résistance varie et que le rendement reste constant, il faut que la force électromotrice croisse proportionnellement à la racine carrée de la résistance.

Lorsque la machine motrice est maintenue immobile, on a $e=0$, $c=0$, et $T_u=0$. Lorsqu'elle n'a aucun travail utile à effectuer, on a $e=E$, $c=1$, et $T_u=0$. Entre ces deux valeurs du rende-

ment o et 1, le travail utile passe par un maximum qui a évidemment lieu quand

$$c = 1 - c,$$

c'est-à-dire lorsque

$$c = \frac{1}{2}.$$

Alors le travail absorbé par la génératrice est

$$T = \frac{E^2}{2R},$$

et le travail utile rendu par la motrice est

$$T_u = \frac{E^2}{4R}.$$

Ainsi la valeur maximum que peut atteindre le travail utile est la moitié du travail absorbé par la génératrice, et ce maximum a lieu quand le rendement est $\frac{1}{2}$. Au-dessus et au-dessous de cette valeur du rendement, le travail utile fourni décroît jusqu'à devenir nul.

Cette loi est encore due à M. Marcel Deprez.

NOTE XVII.

TÉLÉPHONES ET MICROPHONES.

I — TÉLÉPHONES SANS PILE. — BALANCE D'INDUCTION.

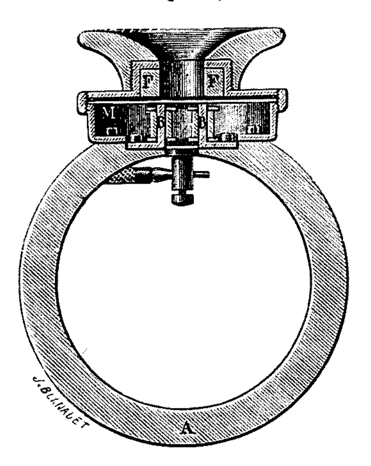
1. Le téléphone décrit au Chapitre XXIX est le téléphone primitif de M. Graham Bell.

M. Siemens, afin d'obtenir des effets plus énergiques, a substitué au barreau aimanté un puissant aimant en fer à cheval, dont les deux pôles agissent simultanément sur le diaphragme vibrant : l'appareil est muni d'un sifflet avertisseur. M. *Gower* a supprimé ce sifflet, mais il a agrandi considérablement la plaque vibrante, qu'il a placée dans une caisse métallique résonnante. L'aimant de son téléphone est recourbé de façon que les deux pôles se trouvent en regard comme dans les électro-aimants de Faraday, destinés à l'étude du diamagnétisme. Enfin un tube acoustique favorise la concentration des ondes sonores.

C'est à M. Ader qu'est due l'amélioration la plus importante : en avant du diaphragme, du côté opposé à l'aimant, est ajoutée une armature de fer doux FF, destinée à surexciter les effets magnétiques produits dans le téléphone (*fig.* 254) ; l'aimant est circulaire, ce qui permet de s'en servir comme poignée. Grâce à la pièce FF, les lignes de force du champ de l'aimant, au lieu de diverger, deviennent sensiblement normales au diaphragme, ce qui détermine une augmentation très appréciable dans l'amplitude

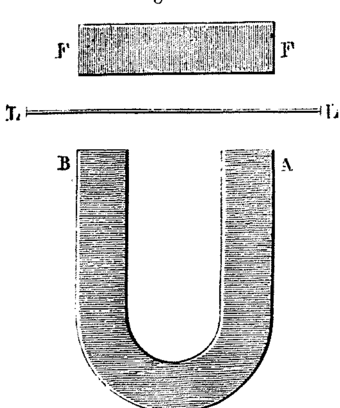
de ses vibrations. L'expérience suivante permet de se rendre un compte exact de l'effet obtenu : on place devant un barreau

Fig. 254.



aimanté AB (*fig.* 255) un ressort LL, à une distance légèrement supérieure à celle à laquelle l'attraction peut avoir lieu. Si l'on

Fig. 255.



approche du ressort une masse de fer doux, telle que FF, on voit immédiatement l'attraction se produire.

Malgré les perfectionnements que nous venons de mentionner, l'application du téléphone sans pile à la télégraphie pratique n'a pu être réalisée pour des distances supérieures à une trentaine de kilomètres. L'extrême délicatesse de cet instrument le rend trop sensible à toutes les causes perturbatrices qui peuvent dénaturer ou annuler les courants qui circulent sur le fil de ligne.

En revanche, cette délicatesse même le rend précieux pour un grand nombre de recherches : ainsi, il est éminemment propre à signaler les courants alternatifs, qui, par leur succession rapide, échappent aux indications du galvanomètre. MM. Wietlisbach et Niemöller l'ont employé pour mesurer la résistance des liquides par la méthode du pont de Wheatstone, et avec des courants alternatifs que produisait un interrupteur placé dans le circuit d'une pile. Le galvanomètre était remplacé dans le pont par le téléphone, et l'on réglait les résistances de manière à le réduire au silence.

Remarque. — On a vu, dans le Chapitre déjà cité, combien est faible l'énergie dépensée par un courant téléphonique. M. Pellat, voulant s'en rendre compte, a fait parler un téléphone à l'aide d'un condensateur recevant la charge d'une pile de force électromotrice connue. La charge et la décharge du condensateur étaient lancées dans le condensateur par un trembleur convenablement réglé. En diminuant progressivement la force électromotrice de la pile, on diminue en même temps la charge du condensateur, et arrive un moment où les sons du téléphone cessent d'être perceptibles : on peut ainsi calculer l'énergie minimum nécessaire pour le faire parler. D'après M. Pellat, elle est si faible, que l'énergie correspondant à la transformation complète d'une calorie, convenablement lancée dans un bon téléphone, permettrait d'obtenir un son continu pendant dix mille ans environ.

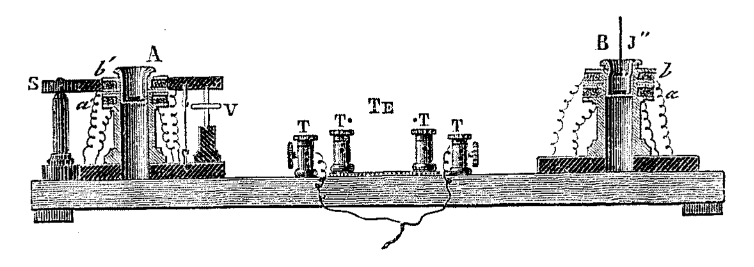
2. **Balance d'induction.** — La balance d'induction, imaginée par M. Hughes, est la plus ingénieuse application qui ait été faite du téléphone; car elle se prête à un grand nombre de recherches, et particulièrement à l'étude des modifications moléculaires des corps.

La partie essentielle de la balance est constituée par quatre

bobines entourant deux tubes d'ébonite ou de buis, le premier A, appelé *tube d'équilibre,* et le second B, appelé *tube d'épreuve* (*fig.* 256).

Deux de ces bobines a et a' (bobines inductrices) sont enroulées en sens contraire. Les deux autres b et b' (bobines induites) sont enroulées dans le même sens, et reliées à un téléphone dont on voit les fils en TE. Si les deux couples de bobines sont parfaitement identiques, les deux courants induits qui se développent dans les bobines b et b' sont de sens contraire et se détruisent

Fig. 256.



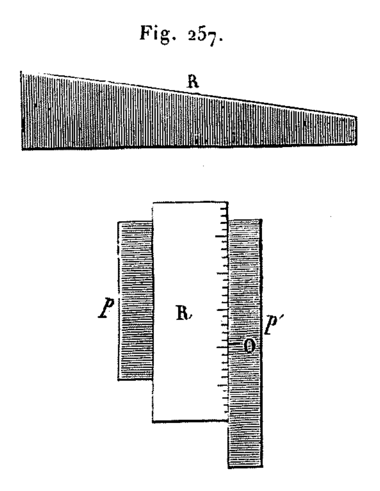
exactement : le téléphone garde le silence. Mais si l'un des courants induits l'emporte, même d'une très faible quantité, le téléphone parle.

La bobine b' est mobile et portée par une pièce d'ébonite articulée en S, que l'on peut soulever ou abaisser à l'aide de la vis V. On a ainsi le moyen de régler l'appareil, avant une expérience, de façon qu'en faisant passer à travers les bobines a, a' le courant d'une pile, interrompu par un trembleur convenable, le téléphone reste silencieux ; on emploie généralement le courant fourni par trois éléments Daniell. En outre, une règle métallique en zinc, R (*fig.* 257), d'inégale épaisseur et en forme de coin, qui a $0^m,30$ de longueur à peu près et est graduée sur sa face supérieure, surmonte le tube d'équilibre A, et permet, lorsqu'on la fait glisser dans ses rainures p et p', de ramener le téléphone au silence par tâtonnement. Elle joue, comme on le voit, le rôle d'un véritable *compensateur*.

L'expérience suivante permet de se faire une idée de la sensibi-

lité de cet appareil. La balance étant réglée ainsi qu'on vient de le dire, introduisons une pièce de monnaie dans un des godets métalliques ménagés à l'intérieur des deux tubes A et B : il y aura immédiatement production d'un bruit très fort. L'introduction de deux pièces de monnaie, à peu près semblables, dans les tubes A et B produira un bruit plus faible. Ce bruit s'éteindra tout à fait si

Fig. 257.



les deux pièces sont complètement identiques par leur titre, leur poids et leur température.

Si l'on introduit successivement dans le tube B des disques égaux de cuivre, d'or, d'argent, etc., on pourra ramener le téléphone au silence au moyen de la règle R, et mesurer en divisions de cette règle la capacité inductrice de ces métaux. On constate qu'elle varie non seulement avec leur état de pureté, mais encore avec leur état physique.

3. Profitant de sa sensibilité, M. Hughes s'est servi de la balance d'induction pour des recherches encore plus délicates. C'est ainsi qu'il l'a employée à l'étude des modifications moléculaires déterminées dans les métaux par des courants interrompus, soit que ceux-ci les traversent directement, soit qu'ils les influencent par l'intermédiaire de bobines magnétisantes. Ces recherches, qui pré-

sentent un haut intérêt pour la théorie complète du téléphone, semblent avoir établi, entre autres résultats, que le passage d'un courant à travers un fil de fer, produit une sorte de torsion moléculaire, et que ce mouvement particulier des molécules donne des sons clairs et perceptibles. Telle serait la cause principale de l'*effet Page*.

La balance d'induction peut servir à la mesure des résistances électriques. On gradue d'abord la règle compensatrice R, en notant les positions pour lesquelles elle ramène le téléphone au silence, lorsqu'on intercale dans le circuit des résistances étalonnées. On introduit ensuite, dans la même portion du circuit, la résistance à mesurer, et l'on peut en lire immédiatement la valeur au moyen de la graduation tracée sur la règle. Au point de vue de la simplicité du dispositif, la méthode suivie par MM. Wietlisbach et Niemöller est évidemment préférable; mais il ne faut pas se faire d'illusion sur l'exactitude des résultats fournis par le téléphone; M. Hughes a démontré en effet, au moyen même de sa balance d'induction, que la sensibilité de l'oreille est très variable avec l'état de santé de l'observateur, la pression atmosphérique, etc., etc.

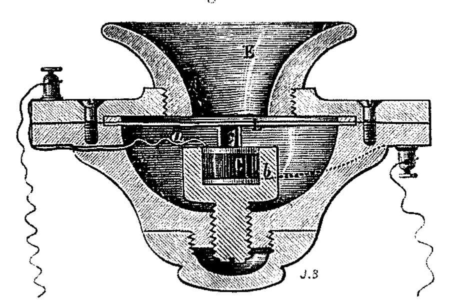
En rendant mobile un des deux couples de bobines de la balance, on a fait de cet instrument une sorte d'explorateur chirurgical pour découvrir le lieu d'un corps métallique enfoncé dans les chairs.

II. — MICROPHONES. — TÉLÉPHONES A PILES.

4. En 1856, M. du Moncel a constaté *qu'une augmentation de pression entre deux conducteurs au contact produit une diminution dans la résistance électrique du circuit où ils sont intercalés*. C'est sur ce principe que reposent, ainsi qu'on l'a vu, le Microphone et le Téléphone à pile. Il ne faudrait pas croire cependant que la variation de résistance intervient seule dans le jeu de ces appareils; M. Ochorowicz a montré qu'on doit encore tenir compte du nombre plus ou moins grand des points de contact et de leurs changements. D'après ce physicien, le microphone est mal nommé : les sons, considérés en eux-mêmes, sont affaiblis par le microphone et ses analogues; mais ils ont pour effet d'amplifier les ébranlements mécaniques, que les appareils transforment en sons.

Le Téléphone à charbon d'Édison est construit comme il suit : Une lame vibrante ou diaphragme L s'appuie par un cylindre de fer *c* sur un cylindre de charbon C qui est formé de noir de fumée

Fig. 258.



comprimé, et qui communique par ses extrémités avec les fils de pile (*fig.* 258).

Quand la lame L vibre sous l'action de la parole, le cylindre de charbon est plus ou moins comprimé ; sa résistance varie donc, et, avec elle, l'intensité du courant. Dès lors, si l'on place à l'extrémité

Fig. 259.

du fil de ligne un téléphone Bell, les sons musicaux, et même la parole articulée, pourront être reproduits. M. Edison, utilisant une idée due à M. Gray, a renforcé les sons transmis, en plaçant dans le circuit une bobine d'induction B : la bobine inductrice et le téléphone transmetteur E communiquent avec les deux pôles de la pile P ; le fil de ligne L communique avec la bobine induite, et aboutit au téléphone récepteur T (*fig.* 259).

La disposition des conducteurs mobiles dans les microphones varie à l'infini suivant le gré des constructeurs. Voici (*fig.* 260) une disposition fréquemment employée : le crayon de charbon métallisé *b*, taillé par les deux bouts en pointe mousse, repose en équilibre presque instable entre deux supports creux et de même matière *a*, *a'* : ce système est introduit, ainsi que le récepteur T, dans le circuit de la pile P. Les supports sont fixés à une plan-

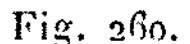
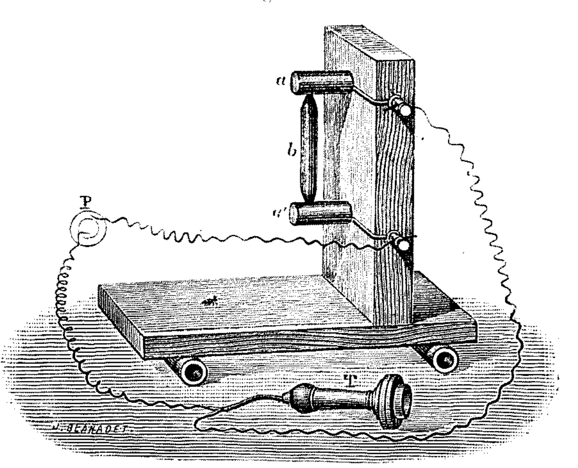


Fig. 260.



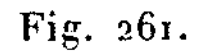
chette verticale, adaptée à une autre horizontale. Le bois de ces planchettes doit être très élastique; il est d'ailleurs essentiel que l'appareil soit à l'abri des trépidations du sol.

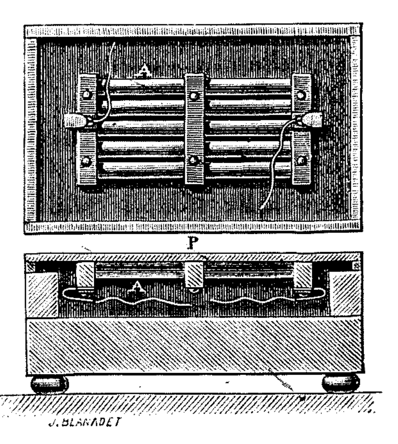
Le transmetteur microphonique dont on s'est servi pour les auditions théâtrales téléphoniques pendant l'Exposition d'électricité de Paris, et qui a été imaginé par M. Ader, appartient au genre de microphones dits à *contacts multiples*. Il se compose (*fig.* 261) de baguettes de charbon métallisé A pivotant sur trois traverses de même substance. Une planchette de sapin très élastique recouvre le système, et c'est au-dessus de cette planchette que l'on parle.

5. On croyait d'abord que les appareils fondés sur le principe de M. du Moncel, excellents comme transmetteurs, ne pouvaient

reproduire la parole articulée. MM. Berliner et Dunand ont démontré qu'il n'en est rien : il suffit, pour obtenir la reproduction de la parole, de polariser préalablement les charbons du récepteur microphonique.

M. Blyth est parvenu au même résultat en se servant, comme


Fig. 261.



transmetteur et comme récepteur, des appareils téléphoniques mentionnés dans le Chapitre XXIX. On sait que ces appareils se composent simplement de fragments de charbon, qu'on place dans une boîte plate munie de deux électrodes de fer-blanc. En mouillant ces charbons, on peut même, d'après M. Blyth, se dispenser de pile.

6. Les résultats fournis par les téléphones à pile, et en général par les transmetteurs que nous venons de décrire, sont très supérieurs à ceux que donnent les téléphones sans pile : ils permettent de transmettre distinctement la parole articulée à des distances de 250^{km}. En employant des dispositions particulières, M. Herz a obtenu des résultats à peu près satisfaisants, même pour des distances de 1100^{km}.

Au moyen du microphone, on peut étudier divers phénomènes physiologiques, tels que le bruit musculaire, les mouvements du

pouls, etc. M. Hughes en a fait un excellent relais téléphonique. Par une modification convenable, il l'a transformé en un véritable thermoscope, assez sensible pour que la chaleur de la main suffise à annuler le courant de trois éléments Daniell. Dans son appareil, la chaleur, dilatant l'air qui entoure les charbons juxtaposés, augmente la résistance du circuit; au contraire, dans le Thermoscope électrique (Microtasimètre) de M. Edison, la chaleur diminue cette résistance en agissant directement sur les charbons dont elle augmente la conductibilité.

III. — TÉLÉPHONES DIVERS. — CONDENSATEUR CHANTANT.

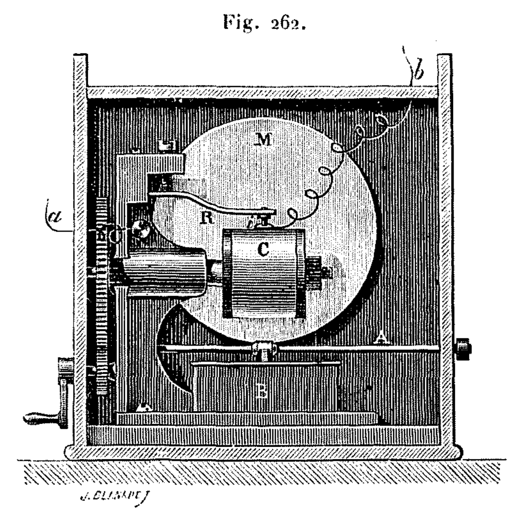
7. Dans certains téléphones, on s'est servi de transmetteurs liquides; dans d'autres, on a choisi pour transmetteur l'arc voltaïque. Tous ces appareils, quels qu'ils soient, reposent sur les mêmes principes que le téléphone d'Edison, c'est-à-dire sur les effets que peut produire la variation de la résistance d'un circuit. Mais il en est qui utilisent des phénomènes d'une nature absolument différente.

Si l'on place sur une lame métallique en communication avec le pôle positif d'une pile une feuille de papier buvard imbibée d'une solution saturée de potasse, et qu'on fasse courir sur cette feuille de papier une lame de platine soumise à une pression régulière, la résistance au glissement est diminuée quand la lame de platine communique avec le pôle négatif de la pile, c'est-à-dire quand l'électrode mobile est polarisée par l'hydrogène, et qu'un courant traverse l'électrolyte dont le papier est imprégné. M. Koch a reconnu que la polarisation de l'électrode mobile de platine par l'oxygène augmente au contraire le frottement en altérant la surface frottante; cette augmentation et cette diminution croissent avec la force électromotrice qui produit la polarisation.

C'est sur cette remarquable propriété du platine polarisé, découverte par M. Edison, qu'est fondé son *Électromotographe* (*fig.* 262). Une lame mince de mica M porte à son centre une lame de platine *i* qu'un ressort R réglé par une vis appuie d'une manière régulière sur un cylindre C. Celui-ci est formé d'une pâte composée de chaux et d'hydrate de potasse avec une faible

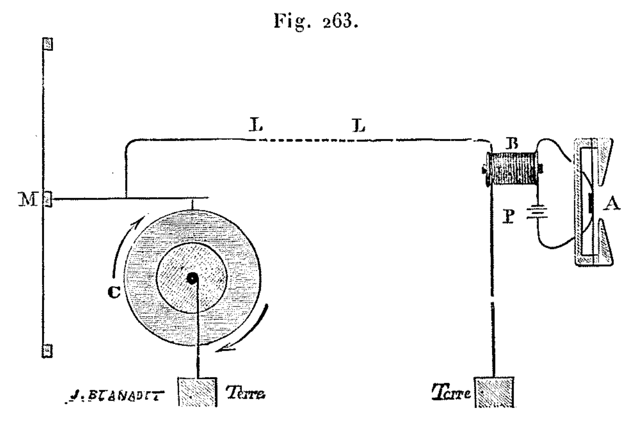
proportion d'acétate de mercure; il tourne d'un mouvement régu-
ier. A chaque variation d'intensité du courant reçu par le fil L

Fig. 262.



correspond une variation du coefficient de frottement, et par suite une variation de la position d'équilibre de la lame de mica. Il

Fig. 263.

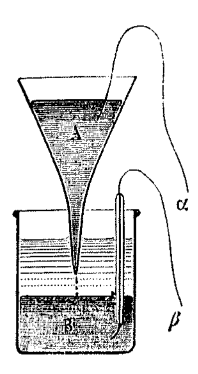


s'opère ainsi dans cette lame des vibrations qui reproduisent les sons, et même la parole articulée. La *fig.* 263 fait comprendre la

disposition employée : en A se trouve le transmetteur qui est un téléphone à charbon; en B est une bobine d'induction.

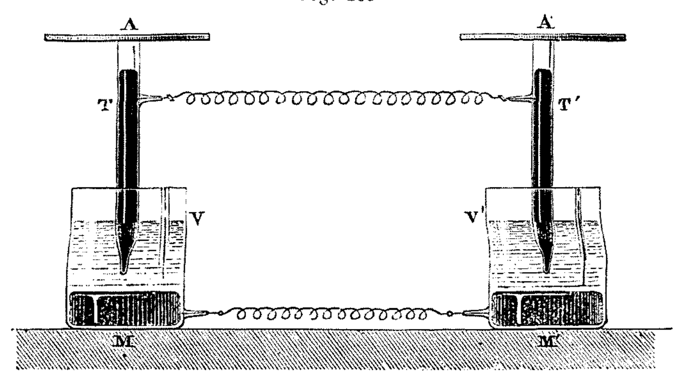
8. M. Lippmann a découvert que la polarisation d'une surface de contact, eau acidulée et mercure, a pour conséquence une variation

Fig. 264.



de la constante capillaire, et par suite, une déformation de la surface de contact. Réciproquement, il devra suffire de déformer

Fig. 265.



la surface de contact, eau acidulée et mercure, pour produire une force électromotrice tendant à rendre à la surface sa courbure primitive.

Supposons que du mercure s'écoule goutte à goutte par la pointe d'un entonnoir effilé, en traversant une couche d'eau acidulée (*fig.* 264) : l'écoulement de chaque goutte produit une augmentation de la surface totale de contact, et, par suite, une électrisation du mercure A. La disparition en B est accompagnée d'une diminution de la surface totale de contact et produit une électrisation inverse du mercure B. Si donc on réunit par un fil les deux masses mercurielles A et B, ce fil sera parcouru par un courant électrique continu.

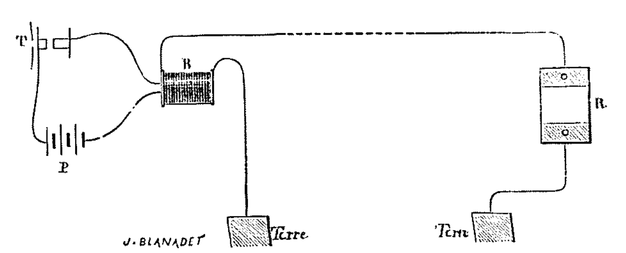
La construction du téléphone à mercure de M. Breguet repose sur ces curieux phénomènes : dans deux vases VV' remplis de mercure et d'eau acidulée (*fig.* 265) plongent deux tubes TT' à bout effilé, contenant du mercure et recouverts par deux membranes vibrantes. On réunit entre elles, par des fils métalliques, les colonnes de mercure T et T' et les couches de mercure M et M' qui occupent le fond des deux vases. Si l'on fait vibrer la lame A, par exemple, il est évident que, sous l'influence des mouvements vibratoires exécutés par la colonne de mercure correspondante T', la lame A' reproduira ces vibrations. Ce téléphone transmet non seulement les sons musicaux, mais encore la parole articulée.

9. **Condensateur chantant.** — En 1863, M. Wright découvrit qu'un condensateur d'Æpinus, soumis à des courants rapidement alternés, pouvait remplacer le récepteur du téléphone musical inventé en 1860 par Reiss (¹). Depuis cette époque, le phénomène a été étudié par divers physiciens, et notamment par MM. Varley et Pollard, qui ont réussi à faire entendre des chants sortant d'un cahier de papier Ce cahier R, qui remplit la fonction de récepteur, est composé généralement de trente feuilles de papier superposées, entre lesquelles sont intercalées vingt-huit feuilles d'étain : il

(¹) Le téléphone de Reiss se composait, comme tous les autres appareils télégraphiques, d'un transmetteur et d'un récepteur. Le transmetteur était analogue à celui du condensateur chantant; le récepteur, pour lequel on mettait à profit les effets observés par Page, en 1837, consistait en un simple fil de fer, de la grosseur d'une aiguille à tricoter, placé dans l'axe d'une bobine magnétisante. Ce téléphone ne pouvait transmettre que les sons musicaux.

constitue ainsi un condensateur dont les feuilles d'étain forment les deux armatures (*fig.* 266). On le charge au moyen du courant produit par une pile de trois à quatre éléments Leclanché P. Pour renforcer les sons, on intercale dans le circuit une bobine d'induction B, comme il a été indiqué au n° 4. Le transmetteur T peut être un microphone; c'est en général un simple interrupteur, formé par une lame vibrante en fer-blanc qui communique avec un des pôles de la pile, et au centre de laquelle est soudé un cylindre de charbon. Un second cylindre de charbon, communi-

Fig. 266.



quant avec l'autre pôle de la pile, est en face du premier et à une distance assez faible pour que la vibration de la lame amène les deux cylindres en contact. Si alors un son musical est produit devant la lame et la fait vibrer, il sera fidèlement rendu par le condensateur récepteur; car à chaque vibration complète de la lame le courant sera alternativement envoyé et interrompu.

En 1880, le Dr Herz a montré qu'en polarisant à l'avance les deux armatures du condensateur, on peut lui faire reproduire la parole articulée, aussi bien qu'aux microphones. D'après M. Dolbear, cette polarisation préalable est inutile si le condensateur est à lame d'air. Suivant M. Maiche, le condensateur lui-même peut être transformé en transmetteur, et actionner un récepteur téléphonique ordinaire.

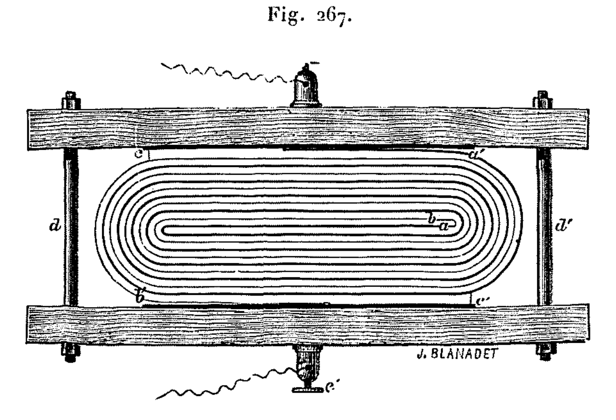
IV. — RADIOPHONIE.

10. **Photophone G. Bell.** — En 1873, MM. May et Willoughby Smith découvrirent que la résistance électrique du sélénium cris-

tallisé diminue sous l'action de la lumière, et que cette diminution de résistance est d'autant plus grande que la lumière est plus intense.

Faisons tomber un faisceau lumineux intermittent sur une lame de sélénium cristallisé placée dans le circuit d'une pile, et appliquons l'oreille contre un téléphone intercalé dans ce circuit. Le téléphone sera traversé par des courants dont l'intensité variera périodiquement; son diaphragme entrera donc en vibration, et le nombre de ces vibrations en une seconde sera égal au nombre des

Fig. 267.



intermittences du rayon lumineux dans le même temps. Tel est le principe du photophone de M. Graham Bell.

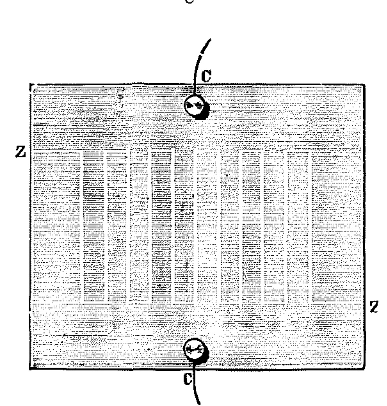
Les meilleurs récepteurs photophoniques sont ceux de M. Mercadier : on enroule d'abord l'un sur l'autre deux minces rubans *a*, *a'*, *b*, *b'*, de cuivre, séparés par deux rubans de papier de même diamètre (*fig.* 267). Ce système, fortement comprimé par les vis *d*, *d'*, et limé sur la tranche, de manière à présenter une surface parfaitement plane, est alors recouvert d'une couche très mince de sélénium.

MM. Graham Bell et Tainter ont montré que le sélénium n'est pas le seul corps dont la résistance électrique varie sous l'action de la lumière : le noir de fumée et le noir de platine jouissent de la même propriété. Leurs récepteurs au noir de fumée sont formés d'une plaque de verre argentée sur laquelle on a évidé, par un

grattage convenable, une sorte de rigole en zigzag ZZ, prolongée jusqu'au bord de la plaque, de façon à diviser la surface argentée en deux parties isolées l'une de l'autre (*fig.* 268). A chacune des moitiés de la plaque est adapté un bouton C, qui sert à les mettre en rapport avec le circuit d'une batterie électrique, comprenant d'ailleurs un téléphone. La surface de la lame est enfumée jusqu'à ce qu'on ait obtenu une bonne couche de noir sur tout le parcours de la rigole.

M. Mercadier a montré que, quelle que soit la nature du récep-

Fig. 268.



teur employé, sélénium ou noir de fumée, ce sont les radiations lumineuses seules qui l'influencent : le maximum d'effet a lieu pour la partie jaune du spectre, c'est-à-dire pour la partie la plus lumineuse; l'effet devient nul en deçà de l'infra-rouge et au delà de l'ultra-violet. Ainsi, comme l'avait déjà trouvé M. Sale, les radiations qui composent la lumière blanche affectent seules le sélénium et les autres corps analogues, absolument comme ces radiations affectent la rétine de l'œil.

Tous les photophones reproduisent la parole articulée.

11. **Thermophone.** — Dans son premier mémoire sur le photophone, M. Graham Bell avait montré que le transport des vibra-

tions sonores ne nécessite nullement l'intervention d'un courant électrique; il suffit en effet de remplacer le récepteur à pile par un disque mince d'ébonite, et d'approcher suffisamment l'oreille du disque; on entend distinctement les sons. En étudiant les effets produits sur tous les corps solides, M. Bell a reconnu expérimentalement la loi suivante : *Lorsqu'on fait tomber un faisceau lumineux intermittent sur un corps solide quelconque, il se*

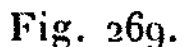
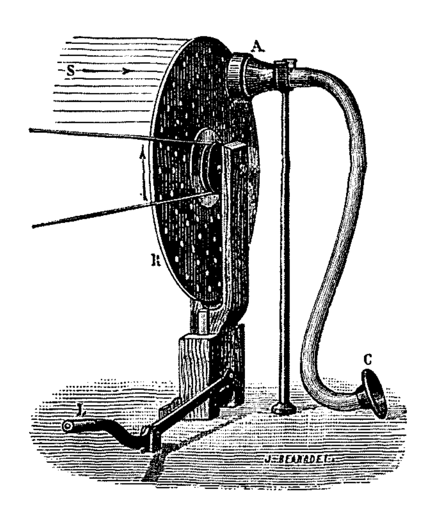


Fig. 269.



produit un son musical dont le nombre des vibrations est égal à celui des intermittences.

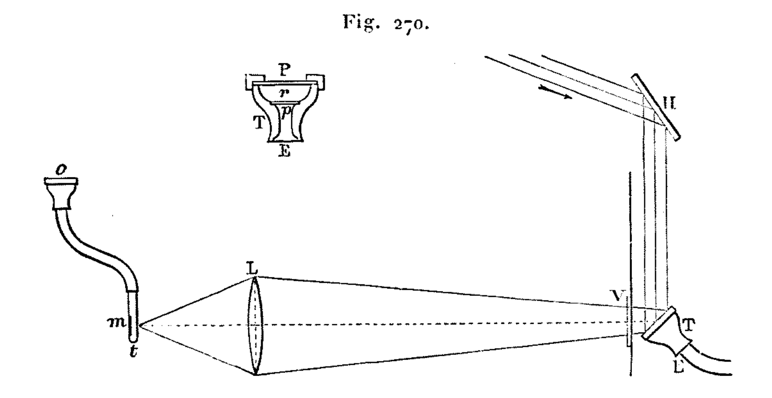
Ces sons, en général extrêmement faibles, peuvent être considérablement renforcés si l'on augmente le pouvoir absorbant calorifique de la substance active.

La *fig.* 269 représente la disposition imaginée par M. Mercadier pour la vérification de cette loi. Un faisceau de rayons parallèles S, provenant du soleil ou de la lumière Drummond, tombe sur un disque tournant R en verre recouvert d'une feuille opaque dans laquelle on a ménagé un certain nombre d'ouvertures rangées sur des cercles concentriques. S'il y a par exemple trente ouvertures

sur l'un des cercles, et si le disque fait dix tours par seconde, il y aura dans cet intervalle de temps trois cents intermittences lumineuses. Ce faisceau, rendu ainsi intermittent, tombe sur un récepteur A, formé d'une plaque en mica, enfumée sur sa face postérieure, et fixée dans une espèce de cornet acoustique. On écoute à l'extrémité d'un tube résonnant de caoutchouc par le pavillon C.

Pour obtenir la reproduction de la parole articulée, on reçoit les rayons solaires ou ceux d'une source C suffisamment puissante sur une plaque argentée P, fermant l'embouchure d'un porte-voix T

Fig. 270.



dans lequel on parle (*fig.* 270). Sous l'action de la voix, le miroir P devient successivement concave et convexe : ses vibrations se traduisent par un épanouissement plus ou moins marqué et, par suite, par une variation d'intensité du faisceau réfléchi. Ce dernier est concentré par une lentille L sur un récepteur *t* formé d'un petit tube de verre contenant intérieurement une lame de mica enfumée *m*. Les variations d'intensité de la radiation reçue en *m* produisent le même effet que les intermittences dans les expériences précédentes : la colonne d'air vibre, et l'oreille placée à l'embouchure *o* perçoit la parole elle-même, avec ses articulations et son timbre.

M. Mercadier, auquel on doit la disposition précédente, a montré que les radiations actives sont ici les radiations calorifiques seules. Le maximum d'effet se produit dans l'infra-rouge, au delà de l'orangé; depuis le jaune jusqu'à l'ultra-violet, il n'y a pas d'effet

perceptible. Le nom de *thermophone* qu'il a donné à cet appareil est donc parfaitement justifié. Quant à la cause des sons produits, elle n'est pas due, comme on le croyait d'abord, à une série de dilatations et de contractions de la substance du récepteur; c'est la couche d'air en contact avec elle qui détermine ces sons. Étant périodiquement échauffée par les rayons calorifiques que la substance solide absorbe, elle éprouve cette succession de contractions et de dilatations qui font vibrer la colonne aérienne tout entière, et produisent les sons perçus. On peut, dans le tube récepteur décrit plus haut, remplacer l'air par des vapeurs et des gaz divers : les sons perçus sont d'autant plus intenses que le pouvoir absorbant du gaz ou de la vapeur pour la chaleur est plus grand.

12. **Remarque.** — Les curieuses propriétés du sélénium ont donné à quelques physiciens l'idée de reproduire à l'aide du sélénium l'image des objets placés à l'extrémité d'un fil télégraphique. Jusqu'à présent, les essais les plus satisfaisants sont ceux de M. Bidwell et de MM. Ayrton et Perry. L'appareil construit par M. Bidwell rappelle le télégraphe autographique Caselli. Dans celui de MM. Ayrton et Perry, le transmetteur est composé essentiellement d'une plaque sensible de sélénium, formée par la réunion d'un grand nombre de petites plaques carrées, qui sont assemblées entre elles à la façon des cases d'un damier et soigneusement isolées les unes des autres. Chacun de ces *éléments* est relié par un fil spécial à l'élément correspondant du récepteur. Chaque élément du récepteur consiste en une petite hélice magnétisante, dont le centre est occupé par un très petit barreau aimanté : celui-ci porte un *obturateur* dont les mouvements ont pour effet d'intercepter plus ou moins complètement un faisceau lumineux. Si donc on projette sur la plaque sensible du transmetteur l'image d'un objet simple, composé de parties noires et blanches (un damier par exemple, ou une fente blanche sur un fond noir), les variations d'intensité du courant dues au sélénium auront pour effet d'élargir plus ou moins dans le récepteur les faisceaux lumineux que les obturateurs interceptent. En projetant sur un écran ces faisceaux lumineux d'intensité variable, on obtiendra une image de l'objet placé devant le transmetteur. L'appareil est donc un véritable *Téléphote*, permet-

tant la vision à distance, par l'intermédiaire d'un courant électrique.

Comme il serait presque impossible de construire un récepteur pareil à celui que nous venons d'indiquer, MM. Ayrton et Perry ont tourné la difficulté en utilisant le phénomène de la persistance des impressions lumineuses sur l'œil. Dans leur dispositif, l'élément de sélénium est mobile et parcourt successivement les différents points de la surface occupée par l'image projetée: le système de projection lumineuse de l'appareil récepteur accomplit les mêmes mouvements.

FIN.

TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES.

F

G

N

O

P

S

T

U

FIN DE LA TABLE ANALYTIQUE.

ERRATA.

Page	Ligne	Au lieu de	Lisez
28	8 en remontant	premier	second
	7	second	premier
42	22 en descendant	semblent s'échapper	s'échappent
46	10 et 11	les métaux composés	les composés
67	14	$0^m,120$	$1^m,20$
93	17	résistance.	résistance totale.
100	18 et 20	980 868	980,868
101	4, 8 et 11	*id.*	*id.*
	13	qu'exerce	qui exerce
108	1	0,00874	0,00374
	3	$0^m,01$	$0^m,001$
	6	980 868	980,868
	11	$a = 1$	$a = 0,1$
112	6 en remontant	367,1	367,8
138	23 en descendant	pôle d'un	pôle nord d'un
141	22	axe	arc
143	5	celle du	celle des pôles du
168	13	l'intervalle	l'intervalle commun.
169	21	$23^{gr},698$	$23^{gr},678$
502	10 en descendant	$-\frac{dT}{d}$	$-\frac{dT}{dt}$
522	1 en remontant	$= md\frac{1}{r}$	$= -md\frac{1}{r}$
565	21	m_2^n	m_n^2

Page 78 *fig.* 44. — *Les lettres* B,A,C,D *doivent être remplacées respectivement par* D,C,A,B.

Page 165 ligne 10. — *Le dernier mot de cette ligne est* due.

Page 187 au bas. — *Ajoutez ce qui suit :* l'unité de capacité s'appelle *farad* et vaut $\frac{1}{10^9}$ unité absolue de capacité.

Page 198 ligne 3 en remontant .— *Supprimez le renvoi.*

Paris. — Imp. Gauthier-Villars, 55, quai des Grands-Augustins.